

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
Escuela Politécnica Superior
Departamento de Tecnología Electrónica



Proyecto Fin de Carrera:

**ANÁLISIS Y ESTUDIO DEL RENDIMIENTO
DE INVERSORES INTEGRADOS EN LOS
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE
CONEXIÓN A RED**

TITULACIÓN: I.T.I Electrónica Industrial

ALUMNO: Adriana Palomar Lozano

TUTOR: Vicente Salas Merino

Leganés, Octubre 2009



ÍNDICE

1. OBJETIVOS	5
1.1 Presentación del proyecto	6
1.2 Objetivos	6
2. INTRODUCCIÓN	7
2.1 Panorama histórico	8
2.2 Ventajas e inconvenientes de la energía renovable	9
2.3 Antecedentes de la energía solar fotovoltaica	14
2.4 Energías renovables en España. Fotovoltaica	16
3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	19
3.1 Tecnología solar fotovoltaica	20
3.2 Aplicaciones	22
3.3 Efectos de la energía solar fotovoltaica	24
3.4 Componentes de un sistema solar fotovoltaico	25
3.5 Componentes de una célula solar fotovoltaica	27
3.6 Orientación de sistemas fotovoltaicos	29
3.7 Tipos de sistemas fotovoltaicos	30
4. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A RED	33
4.1 Características	34
4.2 Valores característicos de un panel fotovoltaico conectado a red	36
4.2.1 Circuito equivalente de la célula solar	36
4.2.2 Curva de trabajo I-V	36



4.2.3 Potencia y punto de máxima potencia	37
4.2.4 Factores que afectan a los paneles fotovoltaicos	38
4.3 Producción de energía en los sistemas fotovoltaicos conectados a red.....	39
4.3.1 La potencia nominal	40
4.3.2 La radiación solar	40
4.3.3 Las sombras	44
4.4 Normativa	44
4.4.1 Protección contra sobretensiones.....	44
4.4.2 Características de la interfaz de conexión a red eléctrica.....	44
4.4.3 Equipos de protección de sistemas fotovoltaicos	44
4.4.4 Normas referentes a la calidad.....	46
4.4.5 Normas genéricas	46
5. INVERSORES	48
5.1 Definición	49
5.2 Topología de potencia	51
5.2.1 Inversores monofásicos	51
5.2.1 Inversores trifásicos.....	53
5.3 Inversores aplicados a la fotovoltaica.....	54
5.3.1 Definición	55
5.4 Normativa	56
6. RENDIMIENTO	58
6.1 Rendimiento de un sistema fotovoltaico	59



6.2 Rendimiento de una célula solar.....	59
6.3 Rendimiento AC/DC de los inversores fotovoltaicos.....	61
6.4 Performance Ratio	62
6.5 Rendimiento europeo.....	63
6.6 Rendimiento californiano	64
6.7 Nuevos métodos de aumentar el rendimiento.....	64
7. DISPOSICIÓN DE ELEMENTOS UTILIZADOS	66
7.1 Descripción del sistema fotovoltaico.....	67
7.1.1 Localización.....	68
7.2 Descripción de los paneles solares fotovoltaicos	70
7.2.1 Características generales.....	70
7.2.2 Características mecánicas y eléctricas	71
7.3 La celda solar calibrada	72
7.4 El inversor	73
7.4.1 Inversor Steca Grid 300.....	73
7.4.1.1 Características eléctricas y mecánicas	75
7.4.1.2 Puesta en servicio y manejo.....	75
7.4.2 Inversor Sunny Boy 1100.....	76
7.4.2.1 Características eléctricas y mecánicas	77
7.4.2.2 Estados y funcionamiento.....	78
7.5 Vatímetro	79
7.6 Software.....	81



7.6.1 LMG control	81
7.6.2 Origin 7.0	83
8. RESULTADOS	86
8.1 Información general	86
8.2 Steca Grid 300	87
8.2.1 Operación en sobrepotencia	87
8.2.2 Caracterización	90
8.2.3 Estudio del rendimiento	93
8.3 Sunny Boy 1100	97
8.3.1 Caracterización	97
8.3.2 Estudio del rendimiento	100
8.4 Comparativa entre inversores	105
8.4.1 Potencia de salida AC	105
8.4.2 Inyección de corriente DC a la red eléctrica	107
8.4.3 Rendimiento	109
8.5 Tablas comparativas	111
9. CONCLUSIONES	115
10. ANEXOS	117
11. BIBLIOGRAFÍA	138



Capítulo 1:

OBJETIVOS

1.1- PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

En la actualidad, la energía solar fotovoltaica está presente en numerosos aspectos de la industria, la vida cotidiana, los aparatos domésticos y un largo etcétera. Este proyecto está basado en el estudio de dispositivos relacionados con este campo, más concretamente, los inversores fotovoltaicos.

La Universidad Carlos III de Madrid cuenta con numerosos módulos de paneles fotovoltaicos. Todos los cálculos realizados se han hecho a partir de un módulo de cuatro, fijo, que se encuentra en la azotea del edificio uno del Campus de Leganés. En capítulos posteriores se determinará, de forma más detallada, la ubicación.

1.2.- OBJETIVOS

Actualmente, se están realizando estudios que demuestran que, si seguimos así, vamos a agotar los recursos terrestres. Se hace necesario, pues, encontrar nuevos métodos que nos suministren energía y que dichos métodos sean “limpios”, es decir, que no constituyan ningún perjuicio al medio que nos rodea. Uno de esos métodos es utilizar energía fotovoltaica, en nuestro caso se va a estudiar uno de los dispositivos que forman parte de la producción de la energía fotovoltaica conectada a red. En concreto, el dispositivo a estudiar es el inversor fotovoltaico, básico en la conversión de la tensión y potencia que se va a inyectar a la red eléctrica, ya que la obtenida de las placas fotovoltaicas es corriente continua y la de la red es corriente alterna.

El objetivo fundamental de este proyecto es la comparación entre varios inversores fotovoltaicos, expuestos a mismas condiciones, tanto atmosféricas, como técnicas. En concreto, se basa en el estudio del rendimiento, ya que es uno de los factores determinantes a la hora de elegir un inversor u otro. Al contarse con medidores de última generación, los datos obtenidos son más concretos y precisos que al haberlo realizado con tecnologías anteriores. Cabe destacar el uso de un vatímetro con capacidad para almacenar, contabilizar y procesar millones de datos.



Capítulo 2:

INTRODUCCIÓN

2.-INTRODUCCIÓN

Este proyecto va a consistir en el estudio del rendimiento de una serie de inversores dentro de una instalación solar fotovoltaica en la Universidad Carlos III de Madrid. El contenido de esta introducción ayuda a la mejor comprensión del emplazamiento histórico de los elementos usados así como su situación en el contexto de la energía solar fotovoltaica española.

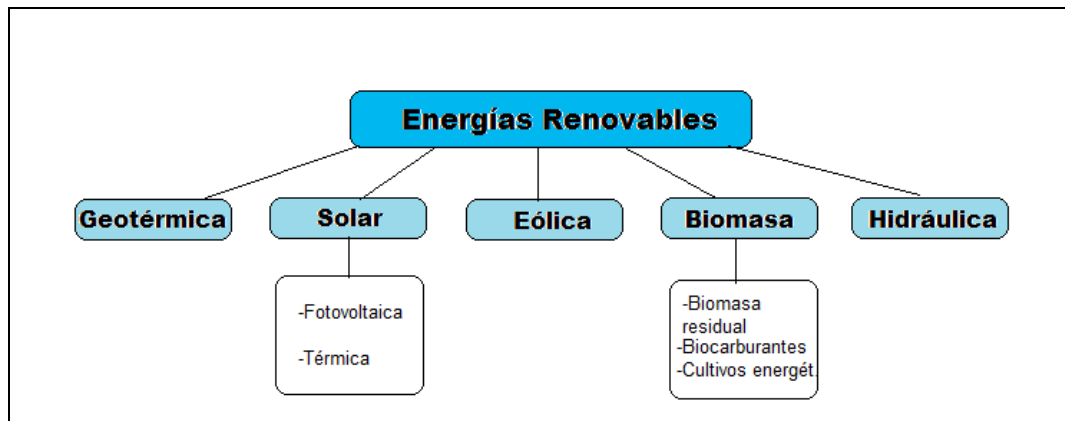
2.1.-PANORAMA HISTÓRICO

A lo largo del siglo pasado, la percepción de la problemática de la energía ha sido muy diferente de la que tenemos actualmente. Así, el hecho de disponer de grandes cantidades de energía a bajo precio ha sido una condición necesaria para acceder a un cierto nivel de calidad de vida. Desde los inicios de siglo hasta principios de los sesenta, el crecimiento económico de los países industrializados se basó, fundamentalmente, en la disponibilidad de una fuente de energía barata y abundante: el petróleo.

El gran problema surgió cuando las demandas energéticas fueron creciendo y el suministro de energía no se podía mantener indefinidamente, ya que los combustibles fósiles tenían una duración limitada. Otra problemática que se extendió rápidamente, fue lo nocivas que eran las energías utilizadas hasta el momento para el medio ambiente.

Las únicas posibilidades de mantener un crecimiento económico sostenible, garantizando un suministro energético a largo plazo y la conservación del medio ambiente son el incremento de la eficiencia y la búsqueda de energías alternativas al petróleo.

Entre las opciones para sustituir progresivamente la utilización masiva del petróleo, se encuentra el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables: energía solar, eólica, hidráulica, biomasa y residuos, geotérmica y la de los océanos. ⁽²⁾



Esquema 2.1. Tipos de energías renovables. ⁽²⁾

En la actualidad, los orígenes del problema energético se podrían resumir en dos. Por un lado hay que tener claro que los recursos de la Tierra son finitos, a lo que se une el hecho de que vivimos en una sociedad de consumo.

Estas pueden ser algunas de las causas del problema medioambiental, para el que todavía no hay soluciones definitivas. Sin embargo, ante la realidad de que el planeta Tierra es finito en cuanto a recursos que el hombre necesita para tener energía, se pueden apuntar ciertas alternativas. Entre ellas está la sustitución de los recursos que se agotan por otros inagotables, como los de las energías renovables, que no contaminan y se renuevan.

2.2.- VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA ENERGÍA RENOVABLE

Las fuentes de energía renovables son distintas a las de combustibles fósiles o centrales nucleares debido a su diversidad y abundancia. Se considera que el Sol abastecerá estas fuentes de energía (radiación solar, viento, lluvia, etc.) durante los próximos cuatro mil millones de años. La primera ventaja de una cierta cantidad de fuentes de energía renovables es que no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones, contrariamente a lo que ocurre con los combustibles, sean fósiles o renovables. Algunas fuentes renovables no emiten dióxido de carbono adicional, salvo los necesarios para su construcción y funcionamiento, y no presentan ningún riesgo suplementario, tales como el riesgo nuclear. Otras ventajas destacables son:

- Es una energía limpia y silenciosa.
- Su implantación es sencilla y de bajo coste.
- Modularidad.
- Versatilidad, portabilidad.
- Bajo coste de funcionamiento.
- Alta fiabilidad.
- Durabilidad.

No obstante, algunos sistemas de energía renovable generan problemas ecológicos particulares. Así pues, los primeros aerogeneradores eran peligrosos para los pájaros, pues sus aspas giraban muy deprisa, mientras que las centrales hidroeléctricas pueden crear obstáculos a la emigración de ciertos peces, un problema serio en muchos ríos del mundo (en los del noroeste de Norteamérica que desembocan en el océano Pacífico, se redujo la población de salmones drásticamente).⁽³⁾



Imagen 2.1. Energía eólica

Un problema inherente a las energías renovables es su naturaleza difusa, con la excepción de la energía geotérmica la cual, sin embargo, sólo es accesible donde la corteza terrestre es fina, como las fuentes calientes y los géiseres.

Puesto que ciertas fuentes de energía renovable proporcionan una energía de una intensidad relativamente baja, distribuida sobre grandes superficies, son necesarias nuevos tipos de "centrales" para convertirlas en fuentes utilizables. Para 1.000 kWh de electricidad, consumo anual per cápita en los países occidentales, el propietario de una vivienda ubicada en una zona nublada de Europa debe instalar ocho metros cuadrados de paneles fotovoltaicos (suponiendo un rendimiento energético medio del 12,5%).⁽⁵⁾



Imagen 2.2. Energía solar⁽⁵⁾

Sin embargo, con cuatro metros cuadrados de colector solar térmico, un hogar puede obtener gran parte de la energía necesaria para el agua caliente sanitaria aunque, debido al aprovechamiento de la simultaneidad, los edificios de pisos pueden conseguir los mismos rendimientos con menor superficie de colectores y, lo que es más importante, con mucha menor inversión por vivienda.

La producción de energía eléctrica permanente exige fuentes de alimentación fiables o medios de almacenamiento (sistemas hidráulicos de almacenamiento por bomba, baterías, futuras pilas de combustible de hidrógeno, etc.). Así pues, debido al elevado coste del almacenamiento de la energía, un pequeño sistema autónomo resulta raramente económico, excepto en situaciones aisladas, cuando la conexión a la red de energía implica costes más elevados.

La diversidad geográfica de los recursos es también significativa. Algunos países y regiones disponen de recursos sensiblemente mejores que otros, en particular en el sector de la energía renovable. Algunos países disponen de recursos importantes cerca de los centros principales de viviendas donde la demanda de electricidad es importante. La utilización de tales recursos a gran escala necesita, sin embargo, inversiones considerables en las redes de transformación y distribución, así como en la propia producción.⁽⁷⁾

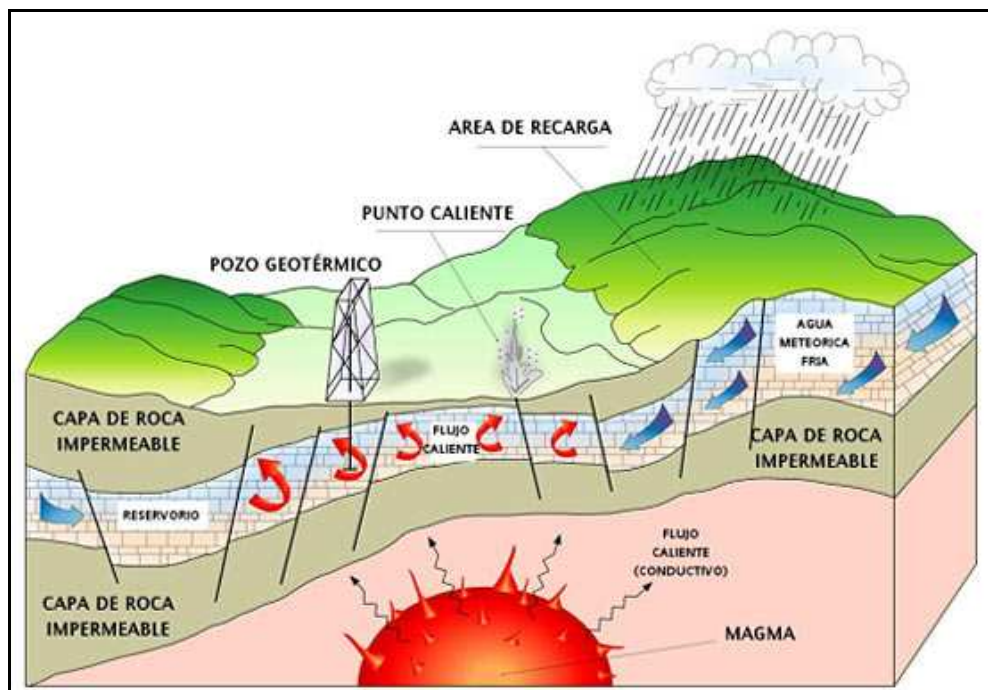


Imagen 2. 3. Energía geotérmica

Si la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables se generalizase, los sistemas de distribución y transformación no serían ya los grandes distribuidores de energía eléctrica, pero funcionarían para equilibrar localmente las necesidades de electricidad de las pequeñas comunidades. Los que tienen energía en excedente venderían a los sectores deficitarios, es decir, la explotación de la red debería pasar de una "gestión pasiva" donde se conectan algunos generadores y el sistema es impulsado para obtener la electricidad "descendiente" hacia el consumidor, a una gestión "activa", donde se distribuyen algunos generadores en la red, debiendo supervisar constantemente las entradas y salidas para garantizar el equilibrio local del sistema. Eso exigiría cambios importantes en la forma de administrar las redes.

Sin embargo, el uso a pequeña escala de energías renovables, que a menudo puede producirse "in situ", disminuye la necesidad de disponer de sistemas de distribución de electricidad. Los sistemas corrientes, raramente rentables económicamente, revelaron que un hogar medio que disponga de un sistema solar con almacenamiento de energía, y paneles de un tamaño suficiente, sólo tiene que recurrir a fuentes de electricidad exteriores algunas horas por semana. Por lo tanto, los que abogan por la energía renovable piensan que los sistemas de distribución de electricidad deberían ser menos importantes y más fáciles de controlar. ⁽⁶⁾

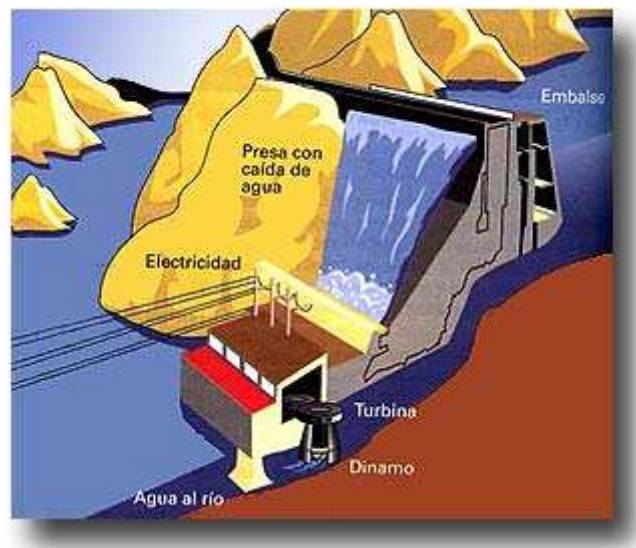


Imagen 2. 4. Energía hidráulica

Un inconveniente evidente de las energías renovables es su impacto visual en el ambiente local. Algunas personas odian la estética de los generadores eólicos y mencionan la conservación de la naturaleza cuando hablan de las grandes instalaciones solares eléctricas fuera de las ciudades. Sin embargo, todo el mundo encuentra encanto en la vista de los "viejos molinos a viento" que, en su tiempo, eran una muestra bien visible de la técnica disponible.

Otros intentan utilizar estas tecnologías de una manera eficaz y satisfactoria estéticamente: los paneles solares fijos pueden duplicar las barreras anti-ruido a lo largo de las autopistas, hay techos disponibles y podrían incluso ser sustituidos completamente por captadores solares, células fotovoltaicas amorfas que pueden emplearse para teñir las ventanas y producir energía, etc. ⁽⁸⁾

2.3.- ANTECEDENTES DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Una vez introducidos los conceptos de energías renovables y las ventajas e inconvenientes, se va a citar el desarrollo histórico de la energía renovable utilizada en este proyecto, la solar fotovoltaica.

El efecto fotovoltaico fue reconocido por primera vez en 1839 por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel. Sus estudios sobre el espectro solar, magnetismo, electricidad y óptica son el pilar científico de la energía fotovoltaica

En 1883 el inventor norteamericano Charles Fritts construye la primera celda solar con una eficiencia del 1%. La primera celda solar fue construida utilizando como semiconductor el Selenio con una muy delgada capa de oro. Debido al alto costo de esta celda se utilizó para usos diferentes a la generación de electricidad. Las aplicaciones de la celda de Selenio fueron para sensores de luz en la exposición de cámaras fotográficas.

La celda de Silicio que hoy día utilizan proviene de la patente del inventor norteamericano Russell Ohl. Fue construida en 1940 y patentada en 1946.



Imagen 2.5. Celda de silicio

La época moderna de la celda de Silicio llega en 1954 en los Laboratorios Bells. Accidentalmente experimentando con semiconductores se encontró que el Silicio con algunas impurezas era muy sensitivo a la luz. Los avances logrados contribuyeron a la producción comercial, lográndose una eficiencia del 6%.

La URSS lanzó su primer satélite espacial en el año 1957, y los EEUU un año después el 1 de Febrero de 1958. En el diseño de este se usaron células solares creadas por Peter Iles en un esfuerzo encabezado por la compañía Hoffman Electronics. La primera nave espacial que usó paneles solares fue el satélite norteamericano Explorer 1, lanzado en Febrero del año

1958. Este evento generó un gran interés en la producción y lanzamiento de satélites geoestacionarios para el desarrollo de las comunicaciones, en los que la energía provendría de un dispositivo de captación de la luz solar. Fue un desarrollo de gran importancia que estimuló la investigación buscando paneles cada vez más eficientes y motivó a la industria de tecnología. El primer mercado de los paneles fotovoltaicos fue entonces dirigido al sector aeroespacial.

Los resultados positivos de la misión Explorar 1 marcaron una pauta en el desarrollo de las comunicaciones y los paneles fotovoltaicos. La celda de Silicio entra en el escenario de la industria y empieza el desarrollo de tecnologías en la producción. El primer paso fue y aun lo es, buscar paneles más eficientes. Esto se logro en 1970, la primera célula solar con heteroestructura de arseniuro de galio (GaAs) y altamente eficiente se desarrolló en la Unión Soviética por Zhore Alferov y su equipo de investigación.

El caso más representativo hoy día del uso de los paneles fotovoltaicos en el sector aeroespacial esta en la Estación Espacial Internacional. La energía utilizada viene de 16 estructuras de 72 metros de envergadura por 12 metros de ancho, 864 metros cuadrados de paneles solares en cada una de ellas. No hay información oficial de la producción de cada una de las estructuras, la única información es que los módulos fotovoltaicos de de alta eficiencia. Los módulos de alta eficiencia para uso aeroespacial son del orden del 20% de eficiencia. Esto es en referencia a la radiación solar sobre la superficie terrestre, al vacío la eficiencia es mucho mayor. Con este dato, cada una de las estructuras proporcionaría alrededor de 170 Kw/h y la generación de las 16 estructuras estaría en alrededor de 2,7 megavatios/hora. Esto si los módulos fotovoltaicos estuvieran sobre la superficie terrestre.



Imagen 2.6. Estación espacial internacional

Usos más comunes y cercanos ahora mismo son instalaciones para generar electricidad tanto en la agricultura, ganadería, electricidad para viviendas, etc.

Las instalaciones con capacidades de uno a diez caladas están siendo lugar común alrededor del mundo para aplicaciones agroindustriales como el bombeo de agua, refrigeración, preservación de productos perecederos, o desalación de agua a. En 1982 se, construyó la primera planta fotovoltaica de potencia, con una capacidad de 1MW, en el estado de California en los Estados Unidos. Esta planta genera suficiente electricidad para satisfacer las necesidades de 300 a 400 casas-habitación en su zona de servicio. Tiempo, después en el mismo estado, se instaló otra planta fotovoltaica de potencia con una capacidad de 6.5 MW, que produce cerca de 14 millones de caladas hora al año, energía eléctrica suficiente para abastecer las necesidades de más de 2,300 casas típicas en el área.

Para 1975 las ventas totales de una de las compañías más grandes del ramo ascendían a 78 kW, con un precio promedio de US \$ 45 por Watt; en 1983 las ventas de esa misma compañía fueron ya de 15,500 kW, con precio de US \$ 9 por Watt. Actualmente el mercado fotovoltaico ha sobrepasado los 50 MW anuales, y para plantas fotovoltaicas de potencia (compras al mayoreo) se cotizan precios menores de US \$5 por Watt. ^{(9) (10) (11) (5)}

2.4.- ENERGÍAS RENOVABLES EN ESPAÑA. FOTOVOLTAICA.

Alrededor de un 80% de las necesidades de energía en las sociedades industriales occidentales se centran en torno a la industria, la calefacción, la climatización de los edificios y el transporte (coches, trenes, aviones). Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones a gran escala de la energía renovable se concentra en la producción de electricidad.

Aunque la primera instalación conectada a red en España, de carácter experimental, comenzó a funcionar en el año 1984, se puede decir que es a partir del año 1992 cuando comienza a desarrollarse este tipo de aplicaciones existiendo a finales de 1997, cuarenta instalaciones conectadas en doce de las diecisiete Comunidades Autónomas que totalizan 1,7 MW de potencia instalada.

Según el informe anual de ASIF 2009, España, con más de 3.350 MW conectados a red, es líder mundial en penetración solar por habitante. La tecnología, ya notablemente

distribuida y socializada – hay más de 50.000 instalaciones-, ha dejado de ser marginal será básica en muy poco tiempo. Gracias a la gran eclosión solar de 2008, España ha alcanzado una masa crítica y aún puede mantener su posición de cabeza en los próximos años, afianzándose en uno de los mercados con mayor proyección global. ⁽⁵⁾



Gráfica 2. 1.Evolución de la potencia fotovoltaica conectada a red⁽⁵⁾

Otros datos de interés, en los que nuestro país destaca son:

- Líder en fotovoltaica per cápita, por delante de Alemania y Luxemburgo, con 75,19 W/habitante.
- Líder en potencia instalada durante 2008, por delante de Alemania y EE.UU., con 2.661 MW.
- Líder en cobertura de la demanda de electricidad, con el 1% en 2008 y alrededor del 1,5% en 2009.
- La fabricación de equipos solares en España creció un 70% en células y un 215% en módulos, lográndose una capacidad de producción nacional de 900 MW anuales, el 7% mundial.
- El mercado fotovoltaico español alcanzó en 2008 un valor superior a los 16.000 millones de euros.

El sector fotovoltaico español está atravesando un periodo transitorio, mientras se adapta dolorosamente a la nueva situación del mercado, gracias al descenso de costes y precios aprobados en la regulación de septiembre de 2008, se aproxima el momento en el que la tecnología solar alcance la rentabilidad sin ningún tipo de ayudas; conocido como Paridad con la Red, ocurrirá a mediados de la década que viene y convertirá a la instalación fotovoltaica en un electrodoméstico más del hogar.

TIPO DE INSTALACIÓN	2009		2010		2011		CUPO 2009-2011
	CUPO (MW)	TARIFA INICIAL	CUPO (MW)	TARIFA INICIAL	CUPO (MW)	TARIFA INICIAL	
En edificio menor de 20 kW	27	34 c€/kWh	29	31,3 c€/kWh	32	28,8 c€/kWh	88
En edificio entre 20 kW y 2 MW	240	32 c€/kWh	265	29,4 c€/kWh	294	27,1 c€/kWh	799
Sobre suelo	233	32 c€/kWh	211	27,8 c€/kWh	171	24,1 c€/kWh	615
Total potencia anual	500		505		497		1.503

→ Cantidades medias más probables.

Tabla 2.1. Evolución del mercado fotovoltaico 2009-2011⁽⁵⁾



Capítulo 3:

SISTEMAS

FOTOVOLTAICOS

3.1.- TECNOLOGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

"Fotovoltaico" viene del griego *foto* (luz) y *volt* (eléctrico), y significa la transformación directa de la energía del sol en energía eléctrica. Los materiales conductores, como el cobre o el aluminio, permiten el fácil paso de una corriente eléctrica, ya que poseen un gran número de cargas libres dentro de sí. Los materiales no-conductores o "aislantes" (como el vidrio o el plástico tradicionales), no poseen cargas libres dentro sí.

La transformación de la energía del sol se produce en células solares; el material más usado en su elaboración es el silicio en forma cristalina pura, este es un semiconductor con muy pocas cargas internas. Su resistividad es muy elevada. Inicialmente a través de un proceso de difusión, se pueden introducir en él pequeñas cantidades de otros elementos químicos (boro y fósforo), los que permiten disminuir el valor inicial de su resistividad creando, al mismo tiempo, zonas con diferentes tipos de carga.

Una célula fotovoltaica utiliza dos tipos de materiales semiconductores formando dos zonas adyacentes:

- Tipo N (negativo): material en el cual la sustancia difusa cede fácilmente electrones, creando una zona dentro del semiconductor que tiene un exceso de cargas negativas (electrones).
- Tipo P (positivo): material en el cual la sustancia difusa atrapa electrones libres, quedando los átomos que los han liberados con un exceso de cargas positivas.

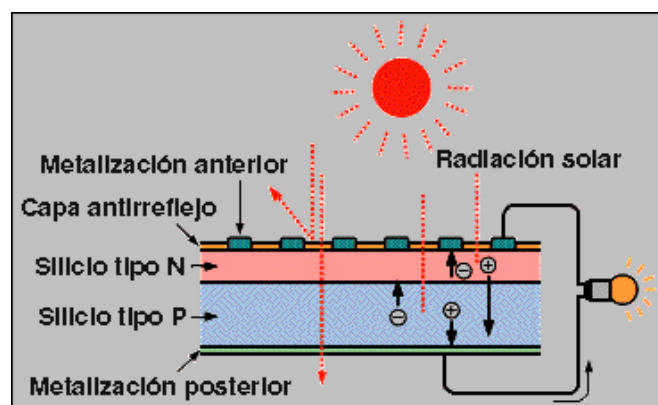


Ilustración 3.1. Efecto fotovoltaico en una célula solar

Estas células son capaces de generar cada una corriente de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,48 Voltios, utilizando como fuente la radiación luminosa. Las células se montan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota) y otra parte por transmisión (atraviesa la célula). El resto es capaz de hacer saltar electrones de una capa a la otra creando una corriente proporcional a la radiación incidente. La capa antirreflejo aumenta la eficacia de la célula.



Imagen 3.1

El Sol produce una enorme cantidad de energía: aproximadamente $1,1 \times 10^{20}$ KW hora cada segundo (1 KW hora es la energía necesaria para iluminar una bombilla de 100 W durante 10 horas). La atmósfera exterior intercepta aproximadamente la mitad de una billonésima parte de la energía generada por el sol, o aproximadamente 1.5 trillones (1.500.000.000.000.000.000) de KW hora al año. Sin embargo, debido a la reflexión, dispersión y absorción producida por los gases de la atmósfera, sólo un 47% de esta energía, o aproximadamente 0.7 trillones (700.000.000.000.000.000) de KW hora alcanzan la superficie de la tierra. ⁽¹³⁾

La cantidad de energía que se consume en el mundo anualmente es aproximadamente 85 billones (85.000.000.000.000) de KW hora, es exactamente la energía que se puede medir. La energía total consumida por el mundo significaría sólo 1/7.000 de la energía solar que incide sobre la superficie de la tierra cada año.

3.2.-APLICACIONES

Las posibles aplicaciones de la energía solar fotovoltaica son numerosísimas, pero en general se distinguen entre aplicaciones aisladas de la red de distribución eléctrica (electrificación rural, aplicaciones agrarias, telecomunicaciones, etc.) y aplicaciones conectadas a la red (centrales de producción de electricidad, instalaciones en edificios, etc.).

Las principales aplicaciones en las que se está utilizando energía solar son:

- Electrificación de viviendas rurales. Se estima que el uso de energía solar fotovoltaica es rentable si la distancia a la red eléctrica más cercana es superior a los 500 metros

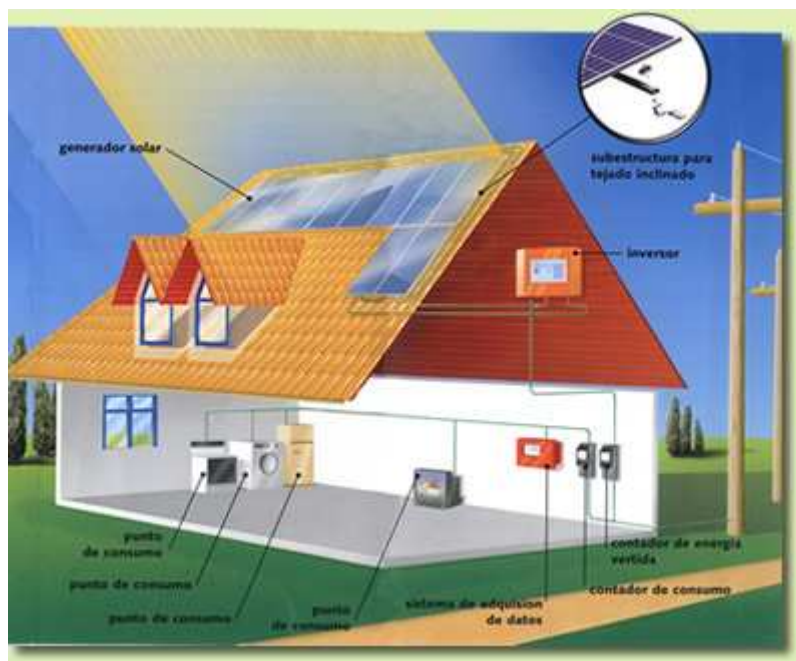


Imagen 3. 2. Energía solar fotovoltaica en una vivienda

- Equipos y estaciones de comunicaciones. Es una de las aplicaciones con mayor crecimiento: teléfonos de emergencia de las autopistas, repetidores...

- Equipos de telemedida cuando éstos se encuentran alejados de la red eléctrica. Suelen ser equipos meteorológicos, medidas ambientales, etc.



Imagen 3. 3. Equipo de telemedida alimentado por energía fotovoltaica.

- Señalización: boyas, balizas y luces para la navegación; señales de tráfico, luces y semáforos; señalización en vías de tren y señalización en aeropuertos.
- Protección catódica de gasoductos y oleoductos. Cualquier metal enterrado bajo tierra o agua sufre los efectos de la corrosión. La protección catódica contra la corrosión se consigue aplicando una pequeña diferencia de potencial entre el metal y el suelo. La utilización de energía solar fotovoltaica en este tipo de aplicaciones es muy frecuente.
- Iluminación pública. Este campo de aplicación se ha reducido y se está aplicando en túneles, parques y caminos, paradas de autobuses, carteles publicitarios...
- Sistemas de seguridad y sirenas de emergencia.
- Cargadores de baterías para vehículos eléctricos.
- Bombeo de agua y sistemas de regadío. Ésta es la aplicación por excelencia. Estas aplicaciones tienen la ventaja de que los requerimientos de energía coinciden el tiempo con los días más soleados. Además el montaje requerido para el bombeo de agua es muy simple y barato.⁽¹⁴⁾



Imagen 3.4. Bombeo de agua mediante energía fotovoltaica

- Electrificación e iluminación de cercas.
- Invernaderos: Circulación del agua, iluminación y equipos de climatización.
- Satélites de todo tipo.
- Calculadoras, teléfonos móviles y otros equipos electrónicos.
- **Net-metering:** Con este término se hace referencia a los casos en los que la energía eléctrica producida que no se consume en la instalación se añade a la red de la compañía eléctrica. Objetivo del proyecto.
- Centrales eléctricas solares: producción a gran escala de energía eléctrica.

3.3.-EFECTOS DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Los principales efectos de este tipo de energía sobre los factores medioambientales son:

- **Clima:** la generación de energía eléctrica directamente a partir de la luz solar no requiere ningún tipo de combustión, por lo que no se produce polución térmica ni emisiones de CO₂ que favorezcan el efecto invernadero.
- **Geología:** Las células fotovoltaicas se fabrican con silicio, elemento obtenido de la arena, muy abundante en la Naturaleza y del que no se requieren cantidades significativas. Por lo tanto, en la fabricación de los paneles fotovoltaicos no se producen alteraciones en las características litológicas, topográficas o estructurales del terreno.

- Suelo: al no producirse ni contaminantes, ni vertidos, ni movimientos de tierra, la incidencia sobre las características físico-químicas del suelo o su erosionabilidad es nula.
- Aguas superficiales y subterráneas: No se produce alteración de los acuíferos o de las aguas superficiales ni por consumo, ni por contaminación por residuos o vertidos.
- Flora y fauna: la repercusión sobre la vegetación es nula, y, al eliminarse los tendidos eléctricos, se evitan los posibles efectos perjudiciales para las aves.
- Paisaje: los paneles solares tienen distintas posibilidades de integración, lo que hace que sean un elemento fácil de integrar y armonizar en diferentes tipos de estructuras, minimizando su impacto visual. Además, al tratarse de sistemas autónomos, no se altera el paisaje con postes y líneas eléctricas.
- Ruidos: el sistema fotovoltaico es absolutamente silencioso, lo que representa una clara ventaja frente a los generadores de motor en viviendas aisladas.
- Medio social: El suelo necesario para instalar un sistema fotovoltaico de dimensión media, no representa una cantidad significativa como para producir un grave impacto. Además, en gran parte de los casos, se pueden integrar en los tejados de las viviendas.⁽¹⁴⁾

3.4.- COMPONENTES DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

- **Un generador solar:** compuesto por un conjunto de paneles fotovoltaicos, que captan la radiación luminosa procedente del sol y la transforman en corriente continua a baja tensión (12 ó 24 V).
- **Un acumulador:** que almacena la energía producida por el generador y permite disponer de corriente eléctrica fuera de las horas de luz o días nublados.
- **Un regulador de carga:** cuya misión es evitar sobrecargas o descargas excesivas al acumulador, que le produciría daños irreversibles; y asegurar que el sistema trabaje siempre en el punto de máxima eficiencia.
 - **Un inversor:** que transforma la corriente continua de 12 ó 24 V almacenada en el acumulador, en corriente alterna de 230 V.

En la ilustración siguiente se observa un esquema de un sistema fotovoltaico.

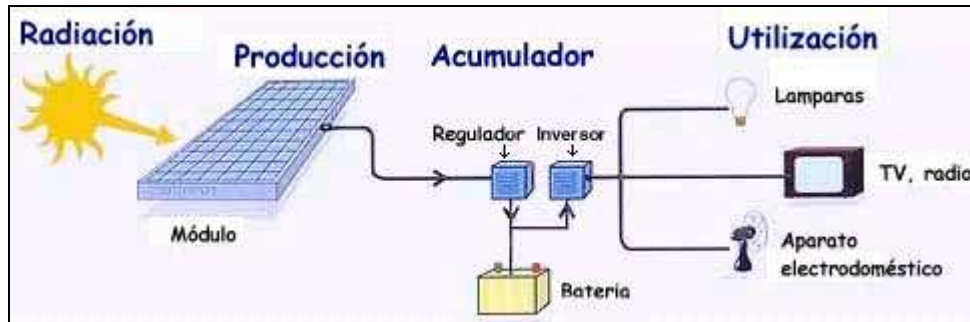


Ilustración 3.2. Instalación solar fotovoltaica con inversor, utilización a 230Vca

Una vez almacenada la energía eléctrica en el acumulador hay dos opciones: sacar una línea directamente de éste para la instalación y utilizar lámparas y elementos de consumo de 12 ó 24 Vcc o bien transformar la corriente continua en alterna de 230 V a través de un inversor. En nuestro caso, es la segunda opción la realizada, ya que lo que nos ha interesado es el funcionamiento del inversor. Todo ello con motivo de obtener los resultados convenientes para una futura elección entre distintos inversores a la hora de ver cual es el mejor en caso de conectar la energía suministrada por las celdas fotovoltaicas a la red eléctrica.

Si en vez de un panel solar se instala un aerogenerador el sistema se denomina eólico. Si se instalan ambos será un sistema mixto. En este caso cada uno debe llevar su propio regulador.

Prácticamente cualquier aplicación que necesite electricidad para funcionar se puede alimentar con un sistema fotovoltaico adecuadamente dimensionado. La única limitación es el coste del equipo y, en algunas ocasiones, el tamaño del campo de paneles. No obstante, en lugares remotos alejados de la red de distribución eléctrica, lo más rentable suele ser instalar energía solar fotovoltaica antes que realizar el enganche a la red.^{(2) (3)}

3.5.- COMPONENTES DE LA CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA

Los paneles van protegidos en su cara exterior con vidrio templado, que permite aguantar en condiciones meteorológicas muy duras tales como el hielo, la abrasión, cambios bruscos de temperatura, o los impactos producidos por el granizo. Una prueba estándar para su homologación consiste en lanzar (con un cañón neumático) una bola de hielo de dimensiones y consistencia preestablecidas al centro del cristal.

Un panel fotovoltaico está formado por un conjunto de células solares conectadas eléctricamente entre sí en serie y paralelo hasta conseguir el voltaje adecuado para su utilización.

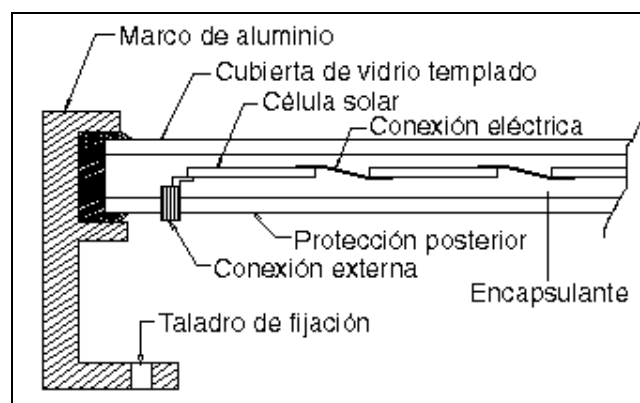


Ilustración 3.3. Corte transversal de un panel fotovoltaico

Este conjunto de células está envuelto por unos elementos que le confieren protección frente a los agentes externos y rigidez para acoplarse a las estructuras que los soportan. Los elementos son los siguientes:

- **Encapsulante**, constituido por un material que debe presentar una buena transmisión a la radiación y una degradabilidad baja a la acción de los rayos solares.
- **Cubierta exterior de vidrio templado**: que, aparte de facilitar al máximo la transmisión luminosa, debe resistir las condiciones climatológicas más adversas y soportar cambios bruscos de temperatura.
- **Cubierta posterior**: constituida normalmente por varias capas opacas que reflejan la luz que ha pasado entre los intersticios de las células, haciendo que vuelvan a incidir otra vez sobre éstas.

- **Marco de metal:** normalmente de aluminio, que asegura rigidez y estanqueidad al conjunto, y que lleva los elementos necesarios (generalmente taladros) para el montaje del panel sobre la estructura soporte.
- **Caja de terminales:** incorpora los bornes para la conexión del módulo.
- Diodo de protección: impiden daños por sombras parciales en la superficie del panel.

Estas células fotovoltaicas son de silicio monocristalino o policristalino. La diferencia entre una y otra radica en el procedimiento de fabricación.

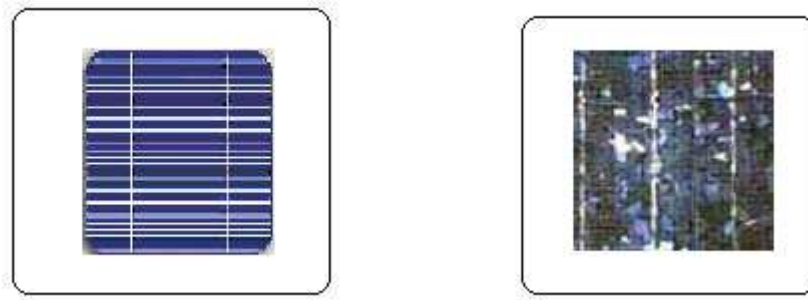


Ilustración 3. 4. Célula de silicio monocristalino y célula de silicio policristalino respectivamente

Las células de silicio monocristalino se obtienen a partir de silicio muy puro, que se refunde en un crisol junto con una pequeña proporción de boro. Una vez que el material se encuentra en estado líquido se le introduce una varilla con un "cristal germen" de silicio, que se va haciendo recrecer con nuevos átomos procedentes del líquido, que quedan ordenados siguiendo la estructura del cristal. De esta forma se obtiene una monocristal dopado, que luego se corta en obleas de aproximadamente 3 décimas de milímetro de grosor.

Estas obleas se introducen después en hornos especiales, dentro de los cuales se difunden átomos de fósforo que se depositan sobre una cara y alcanzan una cierta profundidad en su superficie. Posteriormente, y antes de realizar la serigrafía para las interconexiones superficiales, se recubren con un tratamiento antirreflexivo de bióxido de titanio o zirconio.

En las células policristalinas, en lugar de partir de un monocristal, se deja solidificar lentamente sobre un molde la pasta de silicio, con lo cual se obtiene un sólido formado por muchos pequeños cristales de silicio, que pueden cortarse luego en finas obleas policristalinas. ⁽²⁾

3.6.-ORIENTACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Uno de los elementos auxiliares importantes de un sistema fotovoltaico va a ser la estructura que soporta los paneles. Esto habrá de proporcionar tanto un buen anclaje de los mismo haciéndolos resistentes a la acción de los elementos atmosféricos, como una orientación y un ángulo de inclinación idóneos para el mejor aprovechamiento de la radiación.

La orientación de los paneles fotovoltaicos será al sur (en el hemisferio norte), al ser la única posición donde se aprovecha de un modo más completo a lo largo del año la radiación emitida por el Sol. Solo por circunstancias especiales o por el efecto de sombras creadas por otros objetos, se podría variar dicha orientación hacia el este. La energía procedente del Sol que llega al panel, depende fundamentalmente del ángulo de inclinación que forma con la horizontal. Este ángulo puede adoptar una o varias posiciones a lo largo del año, debe de ser alrededor de 45° para sistemas de consumo constante durante todo el año y dejando este valor fijo, o en sistemas donde el consumo sea mayor en verano que en invierno, se fijará 60° para invierno y 15° para verano. ⁽¹¹⁾

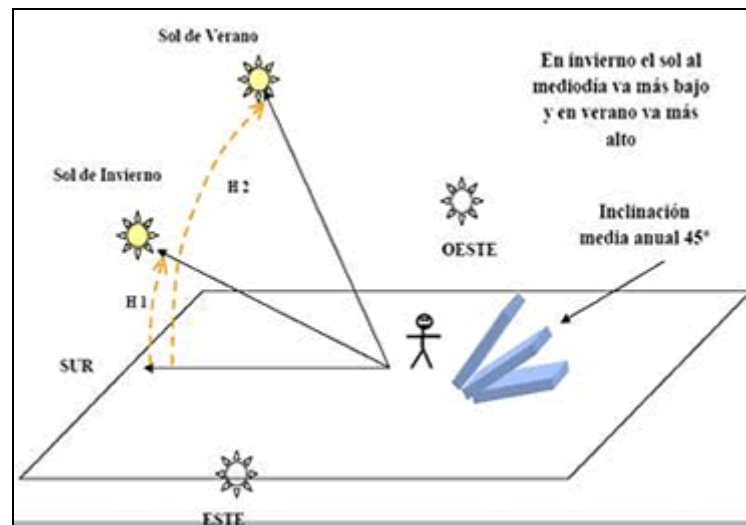


Ilustración 3.5. Orientación de sistemas fotovoltaicos⁽¹⁰⁾

En apartados posteriores se explicará más concretamente como han sido colocadas las células fotovoltaicas usadas en este estudio, sus ángulos, los valores de la irradiancia, tensiones...

3.7.-TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Las instalaciones fotovoltaicas se dividen en dos grandes grupos en función del objetivo de la mismas: instalaciones aisladas de la red, cuya finalidad es satisfacer total o parcialmente la demanda de energía eléctrica convencional residencial o de una comunidad, y las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red, que tienen como objetivo fundamental entregar la energía a la red eléctrica pública; esta última, de gran superficie, se está utilizando como superficie de terminación e imagen en el edificio y es sobre la que se basa nuestro estudio.

- **Instalaciones aisladas de la red**

Se emplean en localidades lejanas, que no tienen acceso a la red pública: instalaciones rurales, iluminación de áreas aisladas, telecomunicaciones, balizas o boyas de señalización y bombeo de agua. Estas instalaciones posibilitan dos tipos de suministros según sea el tipo de distribución:

· *El sistema centralizado*

Consiste en un único gran sistema que cubre las necesidades de un conjunto de usuarios.

La ventaja es disminuir los costos del sistema manteniendo la calidad del suministro.

· *El sistema descentralizado*

Consiste en la instalación de un sistema individual completo en cada vivienda para cubrir sus necesidades; al contrario del anterior, este tiene un mayor costo.

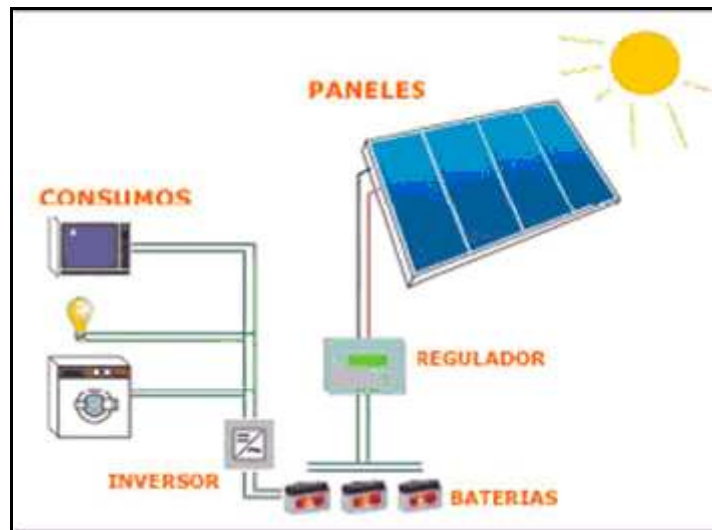


Imagen 3.5. Instalación fotovoltaica aislada

- **Instalaciones conectadas a la red**

En este caso, la red pública actúa como un disipador de energía infinita y acepta toda la energía disponible del sistema fotovoltaico, tanto de centrales fotovoltaicas como de los instalados en viviendas y edificios. Este sistema requiere de condiciones de funcionamiento diferentes a la solución aislada, no necesita de subsistema de almacenamiento, y el sistema de regulación cumple la función de indicar al inversor de energía la disponibilidad en cada momento en los paneles (el punto de máxima potencia); este sistema conlleva, además, un beneficio económico: "huertos solares".

- **Instalaciones Híbridas**

Son aquellas que combinan los módulos fotovoltaicos con una o más fuentes energéticas auxiliares, como pueden ser los aerogeneradores, o los motores Diesel. Este sistema es más fiable que los anteriores, ya que al disminuir la captación y generación de electricidad del sistema fotovoltaico, el suministro no se ve comprometido al ser complementado por otro tipo de generación ya sea renovable o no renovable.⁽¹³⁾

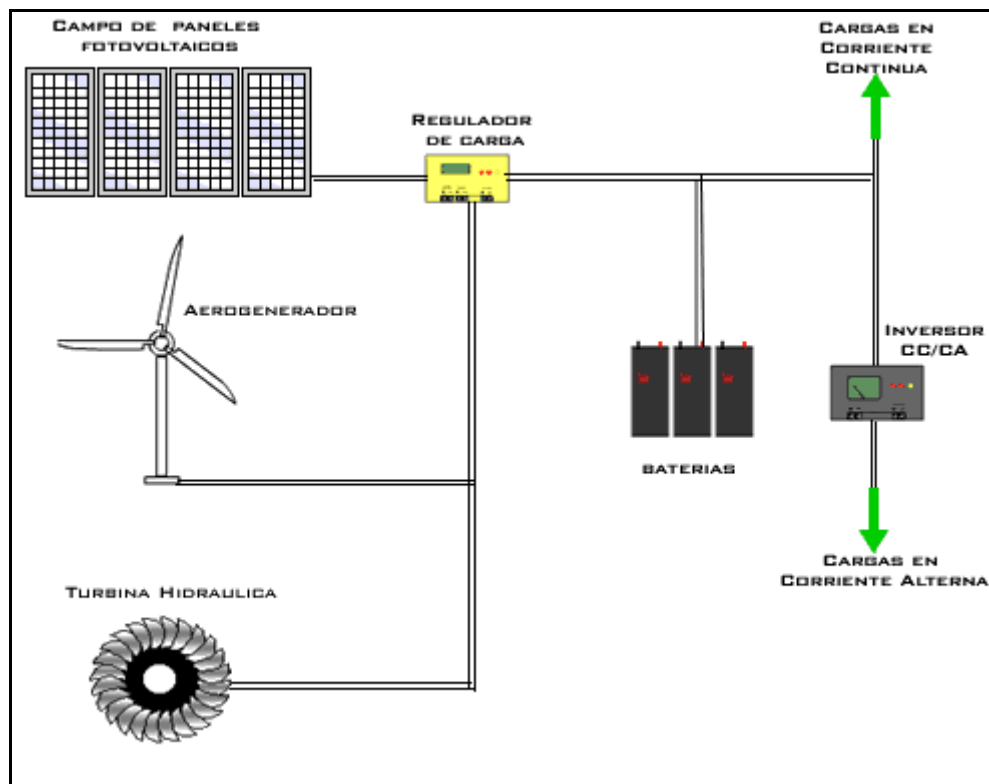


Ilustración 3.6. Instalación híbrida



Capítulo 4:

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A RED



4.-SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A RED

El uso de sistemas fotovoltaicos para generación de electricidad es una práctica cada vez más común en el ámbito internacional. Durante los últimos 30 años el desarrollo tecnológico en este campo ha permitido una reducción de 95 % en el costo de los módulos fotovoltaicos comerciales, a la par de un incremento cercano al 200% en su eficiencia. Un dato que puede servir como referencia para dimensionar el nivel de penetración de esta tecnología en estos últimos años son los más de 1200 MW de potencia pico instalada a nivel mundial, con un crecimiento anual del orden de 16 %.

El uso de generadores fotovoltaicos conectados a red puede aportar importantes beneficios a los sistemas de distribución. Según las características y las condiciones operativas de la red de distribución y su localización, los beneficios son los siguientes:

- Suavización de picos de demanda cuando existe cierto grado de coincidencia entre el perfil de generación fotovoltaica y el perfil de consumo del inmueble o alimentador.
- Alivio térmico a equipos de distribución, lo que implica también la posibilidad de postergar inversiones de capital para incrementar su capacidad o reemplazo.
- Disminución de pérdidas por transmisión y distribución.
- Soporte de voltaje en alimentadores de distribución.
- Compensación de potencia reactiva en el alimentador.⁽¹³⁾

4.1.-CARACTERÍSTICAS

Las principales componentes de un sistema fotovoltaico conectado a la red son:

- **Arreglo fotovoltaico:** es el elemento encargado de transformar la luz del Sol en electricidad. Está constituido por un determinado número de módulos o unidades fotovoltaicas individuales. El número de unidades depende de la potencia nominal requerida en el arreglo y de la potencia pico de los módulos seleccionados. El voltaje de salida del arreglo (corresponde al voltaje de operación del inversor) se obtiene mediante la conexión serie de un número determinado de módulos; y la potencia, a través de la conexión paralelo de dichas series. La potencia nominal de los módulos normalmente está entre 50 y 200 Wp, aunque hoy en día algunos fabricantes ofrecen módulos arriba de 200 Wp.

- **Elemento acondicionador** de la potencia producida (un inversor c.d./c.a.): cuya función es adecuar la energía generada por el arreglo a las características eléctricas de la red para su conexión a ésta. Convierte la corriente directa producida por el generador fotovoltaico a corriente alterna, en fase y a la frecuencia de la red para una conexión segura y confiable del sistema a ésta. La eficiencia de los inversores es generalmente mayor a 90% cuando éstos operan arriba del 10% de su potencia nominal. Para extraer siempre la máxima potencia disponible en el arreglo fotovoltaico, el inversor incorpora entre sus funciones un elemento de control que sigue permanentemente el punto de máxima potencia del arreglo (MPPT, por sus siglas en inglés) mediante un ajuste continuo de la impedancia de la carga.

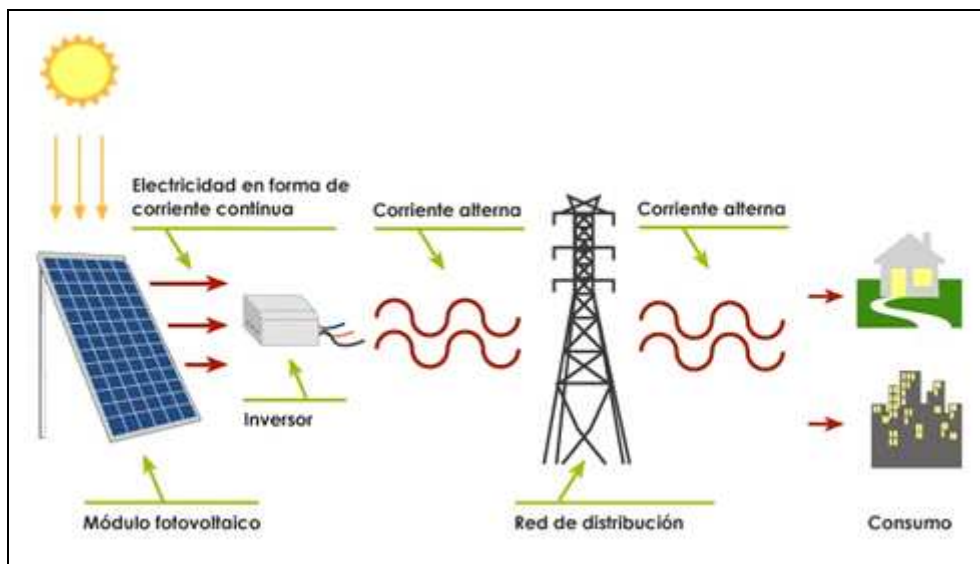


Figura 4.1. Esquema de sistema fotovoltaico conectado a red⁽¹⁴⁾

4.2.-VALORES CARACTERÍSTICOS DE UN PANEL FOTOVOLTAICO CONECTADO A RED.

4.2.1.- CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA CÉLULA SOLAR

Para poder entender, más adelante, las características de la célula solar, uno de los componentes principales del estudio de este proyecto, hay que conocer el sistema equivalente que lo representa. A partir de este, se conocerán el sentido de los valores usados de corriente, tensión, potencia, etc.

El modelo o circuito equivalente ideal de una célula fotovoltaica se representa por una fuente de corriente en paralelo con un diodo. La siguiente figura muestra el modelo ideal de una célula fotovoltaica cuando se conecta a una resistencia de carga:

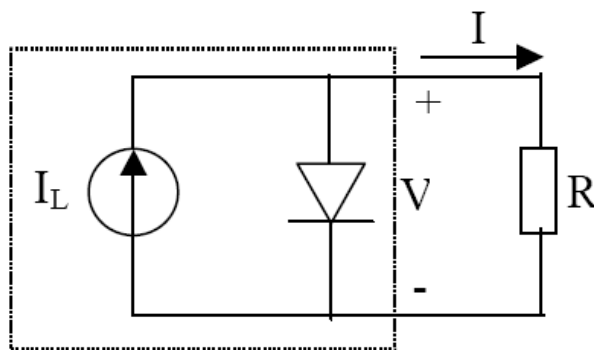


Figura 4.2. Esquema eléctrico equivalente de la célula solar⁽¹⁶⁾

4.2.2.-CURVA DE TRABAJO I-V

Una de las características eléctricas esenciales de los módulos fotovoltaicos es su curva de trabajo I-V. Los valores de tensión y corriente del módulo dependen de la insolación, de la temperatura de la célula, de la masa de aire que atraviese la radiación solar, y por supuesto, de la resistencia de la carga conectada. Para poder comparar unos módulos con otros se homogenizan las condiciones de medida de los valores I-V. Estos son los valores típicos:

- **Tensión de circuito abierto V_{oc} :** este valor se obtiene de los terminales del panel en circuito abierto ($I=0$). La tensión que se genera entre dichos terminales será la máxima.

• **Corriente de cortocircuito I_{sc}** : se obtiene al cortocircuitar los terminales del panel ($V=0$). Al recibir la radiación solar, la intensidad que circularía por el panel es de corriente máxima. . Es indirectamente proporcional a la luz disponible (incidente).

Una vez obtenidos los valores de **V_{oc}** y **I_{sc}** , se necesita saber la forma de la curva. Esto viene determinado por la ecuación característica siguiente:

$$I = I_L - I_S \left[e^{\frac{V}{m \cdot V_t}} - 1 \right] \quad \text{Ecuación 4.1. Ecuación característica de la curva I-V}$$

Donde:

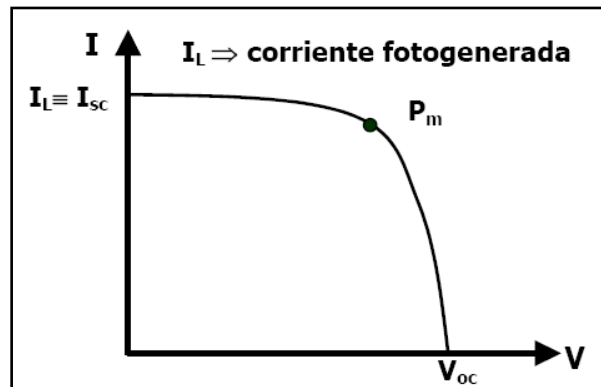
I_L : la corriente fotogenerada (generada por el efecto fotovoltaico).

I_S : la corriente de saturación de oscuridad.

V : tensión aplicada.

m : es el factor de idealidad que varía entre 1 y 2.

Por tanto, la curva característica quedaría de la forma:



Gráfica 4.1. Curva característica V-I⁽¹⁸⁾

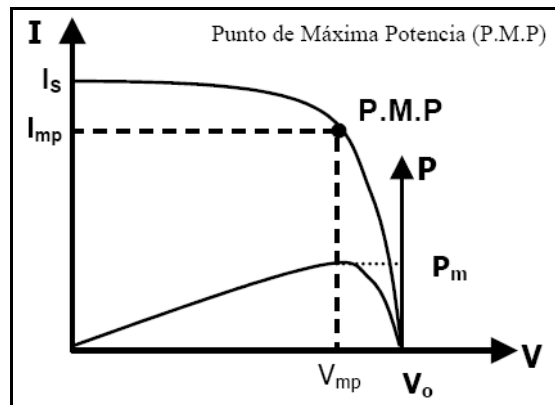
4.2.3.-POTENCIA Y PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA

La potencia entregada a la célula también está definida mediante una ecuación, en ésta, aparecen términos usados en apartados anteriores, ya que, como es sabido, la potencia depende de las magnitudes de tensión y corriente.

La expresión que define a la potencia es la siguiente:

$$P = V.I = V. I_L - V. I_S [e^{V/m.V_t} - 1] \quad \text{Ecuación 4.2. Ecuación de la potencia de una célula solar}$$

Para un valor de la corriente fotovoltaica, ***I_{mp}*** y un valor de la tensión, ***V_{mp}***, la potencia entregada a la carga será máxima, ***P_m***:



Gráfica 4. 2. Punto de máxima potencia⁽¹⁸⁾

P_m: máximo valor de potencia que puede entregar el dispositivo.

I_{mp}: corriente a máxima potencia.

V_{mp}: tensión a máxima potencia.

Con tal de obtener el mayor rendimiento, lo mejor es hacer trabajar a la célula solar siempre en este valor de potencia máxima.

4.2.4.- FACTORES QUE AFECTAN A LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

Una vez conocidos estos parámetros, podemos determinar como afectan diferentes factores a los paneles fotovoltaicos:

- **Intensidad de radiación**: la intensidad aumenta con la radiación, permaneciendo más o menos constante el voltaje. Es importante conocer este efecto ya que los valores de la radiación cambian a lo largo del día, en función del ángulo del sol con el horizonte, por lo

que es importante la adecuada colocación de los paneles. Un medio día a pleno sol equivale a una radiación de 1000W/m². Si está cubierto 100 W/m².

- *Temperatura de las células*: la exposición al sol de las células provoca su calentamiento, lo que lleva aparejados cambios en la producción de electricidad. Una radiación de 1000W/m² es capaz de calentar una célula unos 30° por encima de la temperatura del aire circundante, a medida que aumenta la temperatura, la tensión generada es menor, por lo que es recomendable montar paneles de tal manera que estén bien aireados, y en el caso de que sea usual alcanzar altas temperaturas, plantearse la posibilidad de instalar paneles con un mayor número de células.

- *Factor de forma (FF)*: Otra relación importante es el factor de forma o de relleno, FF. Este factor se define como el cociente entre la potencia máxima que la célula solar puede dar a la carga y la potencia teórica máxima definida por el punto (I_{sc}, V_{oc}):⁽¹⁶⁾

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}}$$

Ecuación 4. 3. Factor de forma⁽¹⁸⁾

Es una medida de la calidad de la unión y de la resistencia serie de la célula. Cuanto mayor es este factor, cuanto más próximo a 1, la característica I-V con iluminación se aproxima más al rectángulo de máxima potencia teórica y, por tanto, la célula es de mayor calidad.

- *Eficiencia de conversión energética*:

$$\eta = P_{AC} / P_{DC}$$

Ecuación 4.4. Rendimiento

4.3.-PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A RED.

La energía producida actualmente por un sistema fotovoltaico conectado a red (en adelante, SFCR), E_{AC}, puede expresarse como el producto de cuatro factores independientes:

$$E_{AC} = P * (G_{daeff} / G *) FSPR$$

Ecuación 4.5⁽¹⁸⁾

Dónde P^* es la potencia nominal, o potencia máxima que entrega el generador en las denominadas condiciones estándar de medida ($1000\text{W}/\text{m}^2$ de iluminación y 25° de temperatura de la célula), G_{daeff} es la irradiación anual efectiva que incide sobre la superficie del generador y FS es un factor que considera las pérdidas por sombreado. PR (performance ratio) es un factor de rendimiento que considera las pérdidas energéticas asociadas a la conversión DC/AC y al hecho de que el rendimiento en las células solares es inferior al que indica el valor de su potencia nominal, debido a que la temperatura de las células suele ser ligeramente superior a 25° . En capítulos posteriores, se tratará de este factor más concretamente. G^* es el valor de la iluminación a la que se determina la potencia nominal de las células y generadores fotovoltaicos, precisamente $1000\text{W}/\text{m}^2$.

4.3.1-LA POTENCIA NOMINAL.

La producción energética unitaria de los SFCR, los famosos “*kilovatio hora por kilovatio pico*”, viene dado por la relación E_{AC}/P^* . La ecuación 6 parece indicar que esta relación depende solo de la radiación que recibe el generador y de la calidad del inversor. Sin embargo, esto solo es así cuando no hay fraude en el valor de P^* . En otras palabras, cuando la potencia nominal que le se suministra coincide con la denominada por el fabricante. La potencia, en realidad, suele estar por debajo de un 5% a un 10% de lo que anuncian los catálogos, y algunas veces incluso inferior a este rango. Naturalmente, la energía generada se ajusta a la realidad del suministro, y cuando este está por debajo de lo anunciado, también lo están los kWh/kWp producidos.⁽¹⁸⁾

4.3.2.-LA RADICIÓN SOLAR

La estimación de la irradiación solar sobre los generadores fotovoltaicos también es terreno propicio al optimismo exagerado. Explicando de forma concisa, la estimación comporta tres pasos:

1.La producción de la irradiación anual sobre una superficie horizontal, $G_a(0)$.

Se hace por el sencillo procedimiento de suponer que coincide con el valor medido en el pasado, a lo largo de un número suficiente de años. Son diversas las entidades u organismos que miden la irradiación solar y publican resultados, en forma de atlas o bases de

datos que contienen un valor de cada mes del año. Como no podía ser de otra manera, diversos organismos significan diversos procedimientos y diversos resultados, que llegan a ser muy diferentes en algunos meses del año. Afortunadamente, la situación es bastante confortable cuando se trata de valores anuales, ya que las diferencias entre unas fuentes de información y otras no son muy grandes. A continuación se muestra una tabla con los datos de Madrid, que en el capítulo de resultados será comparada con los valores medidos en la ejecución del proyecto.

Fuente	$G_a(0)$ en kWh/m ²
CENSOLAR International H-World	1566
Instituto de energía solar	1653
Climatic data handbook-UE	1679
Atlas de la radiación solar en España-INM	1716
Atlas de la radiación solar en Europa-CUE	1591
Soleamiento y energía	1610
solar(Univ.Valencia)	1660
Meteonorm Versión 4.0	1544
NASA	

Tabla 4.1. Irradiación solar anual en Madrid⁽⁵⁾

Puede observarse que la diferencia entre el mayor y el menor de los valores es del 10%. Sin ser grave, esta diferencia aconseja tomar alguna precaución a la hora de elegir la base de datos de referencia.

En la figura que se muestra a continuación, se observan los datos de irradiación solar en España, datos ha tener en cuenta, puesto que la potencia proporcionada por los mismos paneles, según la localización de estos, variará. Evidentemente, cuanto más hacia el Sur nos desplazamos en el mapa, mayores valores de irradiación observamos, por ejemplo en A Coruña el valor global de irradiancia es de 1.58 kW/m², en Madrid es de 2.81 kW/m² y en Granada es de 3.11 kW/m².

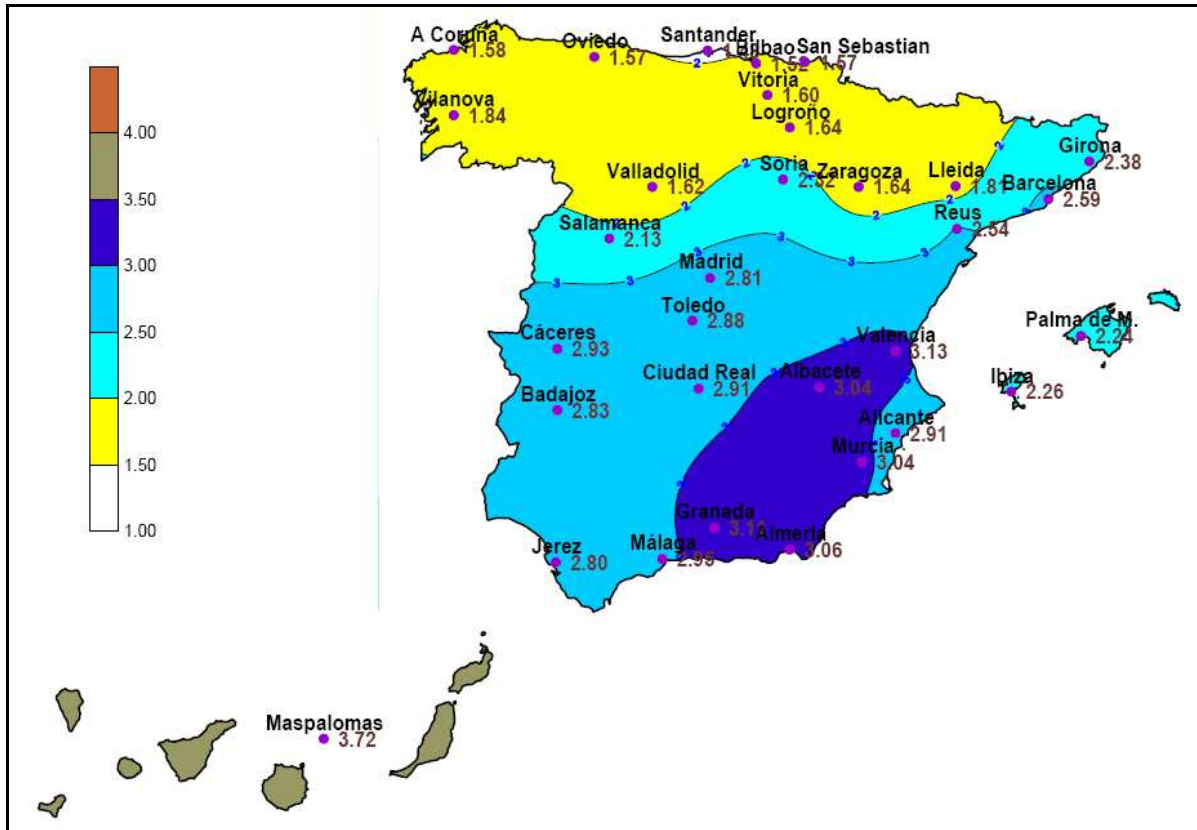


Figura 3. Distribución de la irradiación global media en España (Kwh/m2) ⁽²³⁾

2. La estimación de la irradiación anual incidente sobre una superficie inclinada de tal manera que maximice la captación de la radiación solar $G_a(\beta_{opt})$

El cálculo de irradiaciones sobre superficies inclinadas, a partir de datos sobre superficie horizontal, es objeto de permanente revisión en ámbito de los estudiosos de la radiación solar, siendo además varias las aplicaciones informáticas disponibles para llevarlo a cabo. Como consecuencia, existe una amplia variedad de métodos y herramientas de cálculo, que pueden causar cierta confusión a quien se acerque al tema por primera vez. Sin embargo, la confusión es más aparente que real, ya que casi todas las propuestas conducen a resultados muy parecidos. Se ha resaltado, como muestra, una de las ecuaciones usadas, el criterio es simplemente, por la sencillez de los parámetros.

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69\phi \quad \text{Ecuación 4.7}^{(18)}$$

Donde β_{opt} es la inclinación de la superficie óptima, y ϕ es la latitud. De esta forma vemos que están relacionadas (ambos ángulos expresados en grados). Teniendo en cuenta esta relación, obtenemos, por tanto, la fórmula con la que se estima la irradiación anual óptima:

$$G_a(\beta_{opt}) = G_a(0) / [1 - 4,46 \times 10^{-4} \beta_{opt} - 1,19 \times 10^{-4} \beta_{opt}^2] \quad \text{Ecuación 4. 8}^{(18)}$$

3. La estimación de la irradiación anual efectiva sobre la superficie del generador.

Otros factores significativos a tener en cuenta son la suciedad o la lisura de las células, las cuales suponen pérdidas significativas en la captación de la radiación solar que incide sobre módulos con ángulos alejados de la perpendicular. Se han ido desarrollando, con el paso del tiempo, fórmulas que incluyen las condiciones que producen pérdidas, algunos de los parámetros que incluyen dichas fórmulas son G_{effa} (estimación de la irradiación anual), g_i (coeficientes que indican el grado de suciedad de las placas), y los más usados α , el azimut, que es el ángulo de desviación con respecto al Sur, y β , que es el ángulo que representa la inclinación con respecto a la horizontal.

En la imagen siguiente se puede observar la representación del dos de los parámetros citados.

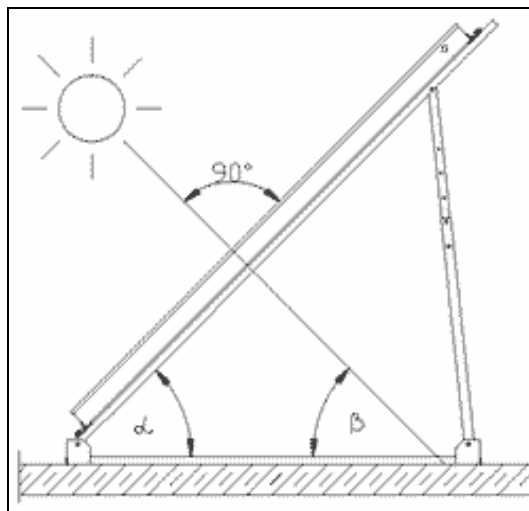
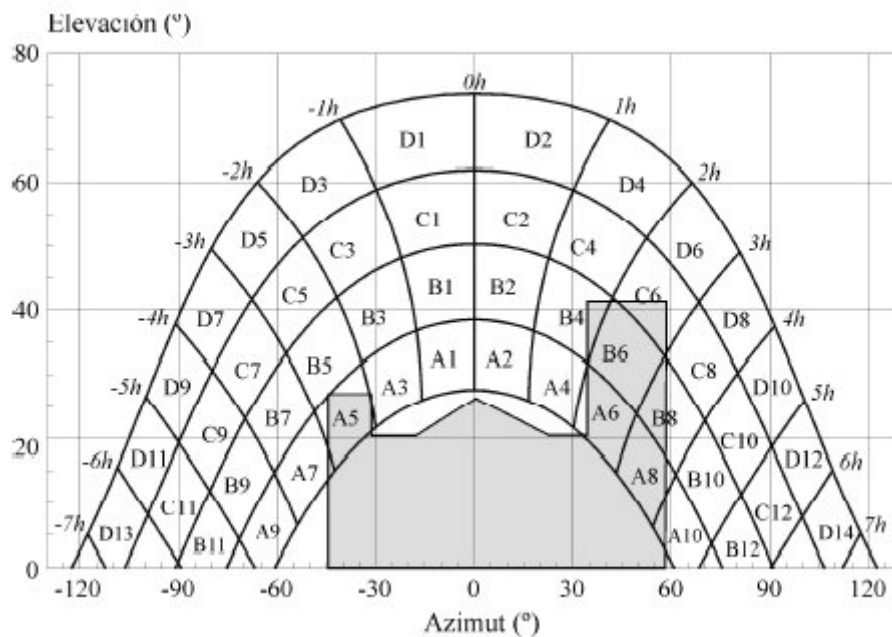


Imagen 4.1. Ángulos α y β ⁽¹⁸⁾

4.3.3.-LAS SOMBRAS

La integración de los generadores en edificios, como es el caso de este proyecto, representa uno de los mayores atractivos de los sistemas fotovoltaicos conectados a red. Pero también representan pérdidas potenciales en radiación y orientación, no solo porque las superficies utilizadas difieren en inclinación y orientación de la óptima, sino también porque su entorno geográfico puede hacer que no estén libres de sombras (otros edificios, chimeneas, árboles...). De hecho, las pérdidas por este concepto suelen ser mayores que las derivadas de la imperfecta orientación. La superposición del horizonte local a un mapa de trayectorias del Sol, permite determinar directamente el tiempo que el generador permanecerá a la sombra. El cálculo que precisa la traducción de este concepto puede resultar muy laborioso, ya que, de una u otra manera, hay que asociar cada valor energético a una u otra dirección del cielo, lo que dista de ser evidente. Esta dificultad explica, en parte, la poca frecuencia con que las sombras se consideran, con cierto rigor en los proyectos. Para facilitar la tarea, el IES diseño un procedimiento gráfico, de aplicación inmediata.

A continuación se muestra un ejemplo de un mapa de trayectorias solares, la superficie de estudio esta ubicada en Madrid, inclinada 30° y orientada 10° al Sudeste.



Gráfica 4.3. Mapa de trayectoria solar⁽¹⁸⁾

4.4.- NORMATIVA

Una norma es un documento que contiene una serie de especificaciones técnicas, reglas y características optimizadas. Todo ello elaborado y aprobado en consenso por un organismo reconocido. En el caso de la fotovoltaica, estos organismos son: CEI (Comisión Electrotécnica Internacional, Underwriters Laboratories (UL), IEEE...

La normativa para sistemas fotovoltaicos de conexión a red es muy extensa, ya que, desde la Unión Europea con organismos como el CENELEC, hasta cada provincia, tienen sus propios criterios. En este epígrafe se adjunta un pequeño resumen general de las normas que se han de cumplir y una breve descripción de las mismas.

4.4.1.-PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES

En este campo, la norma a seguir es la norma UNE-EN 61173:1998, donde se pretende identificar los orígenes de las sobretensiones aleatorias (incluyendo rayos) y definir los tipos de protección tales como la puesta a tierra, blindaje...

4.4.2.-CARACTERÍSTICAS DE LA INTERFAZ DE CONEXIÓN A RED ELÉCTRICA

Esta norma contiene los requisitos de la interfaz entre el sistema fotovoltaico y la red, y las recomendaciones técnicas.

Todos los parámetros de calidad de energía eléctrica (tensión, frecuencia, armónicos, factor de potencia) propone que se midan a la salida de la interfaz salvo que se especifique de otro modo.

4.4.3.-EQUIPOS DE PROTECCIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS Y SEGURIDAD DEL PERSONAL

Como cualquier otra instalación eléctrica, estas instalaciones se habilitan con los medios apropiados para realizar, adecuadamente y de forma segura, la conexión y desconexión eléctrica del sistema fotovoltaico de la red; y para proporcionar la adecuada protección al equipo y a las personas contra condiciones de operación no deseadas. Para tales



efectos, se aplica la norma IEEE Std1547 (IEEE, Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems).

También se aplican otras normas UNE, que tienen que ver más con los equipos electrónicos específicos usados. Ejemplos: UNE-EN 501078:1998 (sobre equipos electrónicos para uso en instalaciones de potencia), UNE-EN 61730-1:2007 (sobre cualificación de seguridad en módulos fotovoltaicos)...

4.4.4.-NORMAS REFERENTES A LA CALIDAD

Desde principios de los años 90, el concepto de calidad de potencia ha ido ganando cada vez más notoriedad y hoy en día se ha convertido en una cuestión de sumo interés. Por ello, la normativa relacionada con este tema ha crecido notoriamente en estos últimos años. Hay normas referidas a la calidad como pueden ser:

- UNE-EN 61000-3-2:2006 Compatibilidad electromagnética
- UNE-EN-6: 2002 Inmunidad de entornos residenciales, industriales...
- UNE-EN-5: Normas en cuanto a la familia de cada producto

4.4.5.-NORMAS GENÉRICAS

- Las instalaciones fotovoltaicas de particulares podrán conectarse legalmente a las redes de distribución, y será posible vender energía a las Compañías Eléctricas. La energía solar podrá recibir ayudas a través de la factura de la luz, en una cantidad superior a las demás energías.

- Las compañías eléctricas están obligadas a firmar un contrato con cualquier productor de las energías incluidas en el decreto, y a comprar toda la energía ofrecida por estos productores al precio de mercado más la prima. Hay un régimen económico diferenciado para cada fuente renovable de energía.

- Y sólo los productores de energía con fuentes renovables (excepto biomasa) pueden vender toda la energía que producen, no sólo los excedentes.



- La novedad más relevante que introduce el RD 2818/1998, consiste en establecer una prima a la producción de electricidad procedente de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red (hasta 60 pesetas/kWh). Se introduce para potenciar la participación de energía no contaminante.

- El Real Decreto 2818/1998 de 23 de diciembre requiere de un complejo desarrollo posterior (y el texto del RD así lo refleja) para hacer posible (entre otras cosas) la implantación de una parte del 1.000.000 kWp perteneciente a la campaña para promocionar las instalaciones fotovoltaicas (1999-2003) de la Dirección General XVII de la Comunidad Europea.⁽¹⁷⁾



Capítulo 5:

INVERSORES

5.1.-DEFINICIÓN

Un inversor, también llamado ondulador, es un circuito utilizado para convertir corriente continua en corriente alterna. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente directa a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador. Los inversores se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras, hasta aplicaciones industriales para manejar alta potencia. Los inversores también se utilizan para convertir la corriente continua generada por los paneles solares fotovoltaicos, acumuladores o baterías, etc, en corriente alterna y de esta manera poder ser inyectados en la red eléctrica o usados en instalaciones eléctricas aisladas.⁽⁴⁾



Imagen 5.1. Varios modelos de inversores fotovoltaicos.

Un inversor simple consta de un oscilador que controla a un transistor, el cual se utiliza para interrumpir la corriente entrante y generar una onda cuadrada. Esta onda cuadrada alimenta a un transformador que suaviza su forma, haciéndola parecer un poco más una onda senoidal y produciendo el voltaje de salida necesario. Las formas de onda de salida del voltaje de un inversor ideal deberían ser sinusoidales. Una buena técnica para lograr esto es utilizar la técnica de PWM logrando que la componente principal senoidal sea mucho más grande que las armónicas superiores.

Los inversores más modernos han comenzado a utilizar formas más avanzadas de transistores o dispositivos similares, como los tiristores, los triac's o los IGBT's.

Los inversores más eficientes utilizan varios artificios electrónicos para tratar de llegar a una onda que simule razonablemente a una onda senoidal en la entrada del transformador, en vez de depender de éste para suavizar la onda.

Se pueden clasificar en general en dos tipos: 1) inversores monofásicos y 2) inversores trifásicos.

Se pueden utilizar condensadores e inductores para suavizar el flujo de corriente desde y hacia el transformador.

Además, es posible producir una llamada "onda senoidal modificada", la cual se genera a partir de tres puntos: uno positivo, uno negativo y uno de tierra. Una circuitería lógica se encarga de activar los transistores de manera que se alternen adecuadamente. Los inversores de onda senoidal modificada pueden causar que ciertas cargas, como motores, por ejemplo; operen de manera menos eficiente.

Los inversores más avanzados utilizan la modulación por ancho de pulsos con una frecuencia portadora mucho más alta para aproximarse más a la onda seno o modulaciones por vectores de espacio mejorando la distorsión armónica de salida. También se puede predistorsionar la onda para mejorar el factor de potencia ($\cos \Phi$).

Los inversores de alta potencia, en lugar de transistores utilizan un dispositivo de conmutación llamado IGBT (Insulated Gate Bipolar transistor ó Transistor Bipolar de Puerta Aislada).⁽¹⁵⁾

5.2.-TOPOLOGÍA DE POTENCIA

5.2.1.-INVERSORES MONOFÁSICOS

Este tipo de topología es en la que la fuente de alimentación es de tipo monofásica. La forma de controlar la tensión de entrada puede ser muy variada, como ya se ha citado en el apartado anterior. En este caso se tendrá en cuenta que el control no se lleva a cabo por modulación de onda. Hay tres configuraciones principales:

- *Inversor en medio puente*: en esta configuración, un extremo de la carga está conectado permanentemente al punto medio de la batería o fuente de c.c. el otro extremo se conecta alternativamente a los polos + y - mediante semiconductores de potencia, teóricamente son transistores. Topología adecuada para tensión alta en la batería y potencia media en la carga. ⁽¹⁾

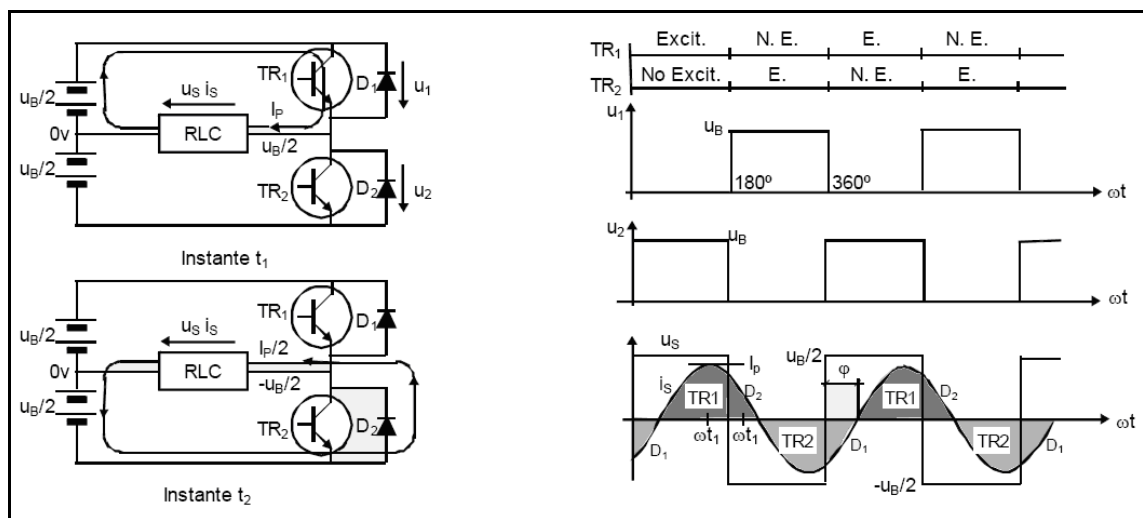


Figura 5.1. Inversor monofásico de medio puente⁽¹⁾

- *Inversor en puente completo*: consiste en dos ramas de semiconductores conectadas, como en la configuración anterior, a la batería. Entre los puntos medios X e Y de la Figura 2 se conecta la carga. Se han utilizado como semiconductores tiristores en antiparalelo con diodos para conducir la intensidad reactiva. Topología adecuada para tensión en la batería y potencia en la carga altas. Doble número de interruptores de potencia que en el medio puente y que en el Push-Pull y de gobierno más complejo por no tener un terminal referido a masa.

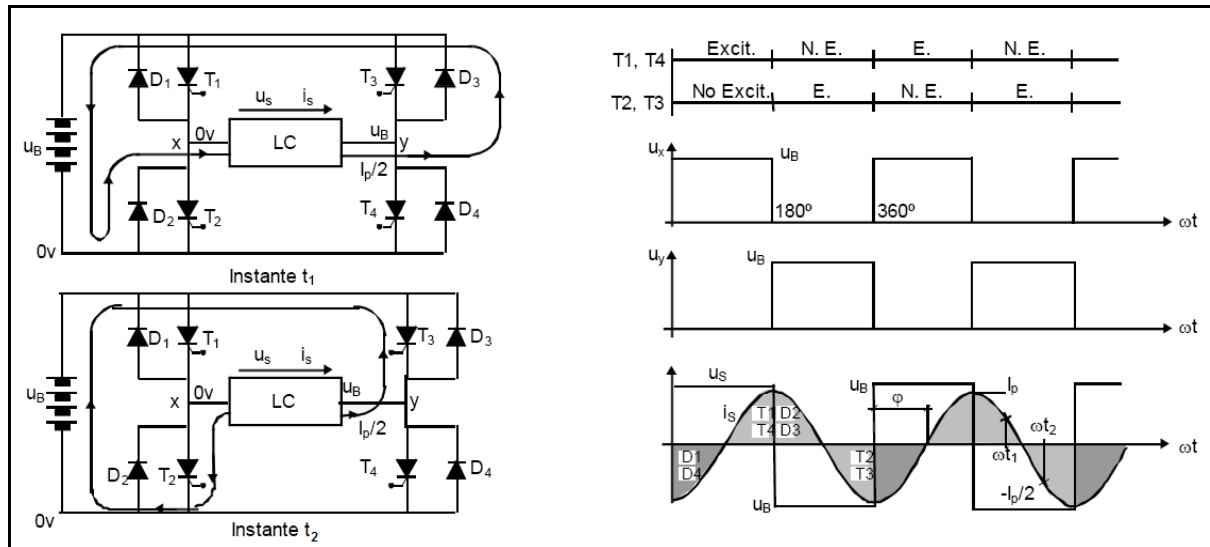
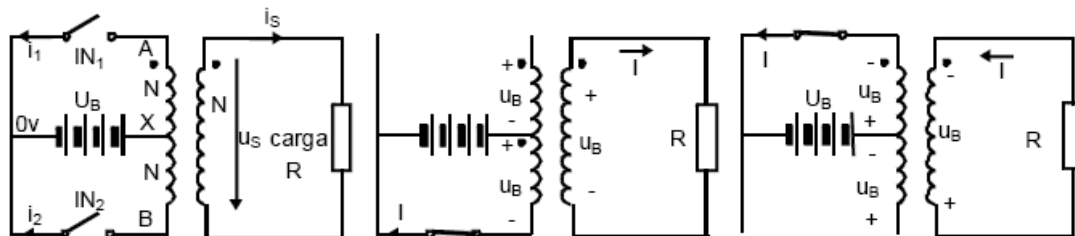


Figura 5.2. Inversor monofásico en puente completo⁽¹⁾

- *Inversor Push-Pull*: es una configuración más compleja, donde intervienen transformadores. El transformador de toma media tiene un factor de utilización bajo el primario y empeora bastante el rendimiento de los circuitos prácticos. No es aconsejable utilizar esta topología para potencias de más de 10kVA. Solo utiliza dos interruptores de potencia y ambos están referidos a masa, por tanto, su gobierno es más sencillo.



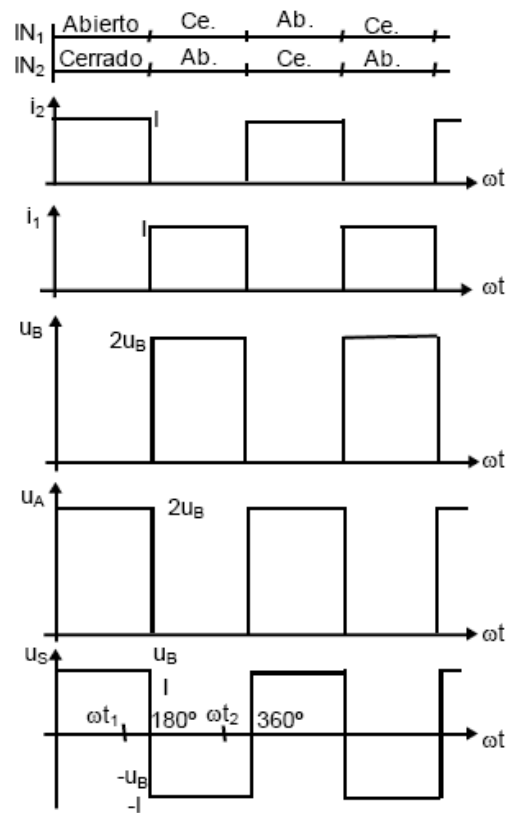


Figura 5. 3. Inversor Push-Pull⁽¹⁾

5.2.2.-INVERSORES TRIFÁSICOS.

- *Puente trifásico*: según el tipo de control de onda la utilización de este tipo de inversor será distinta.

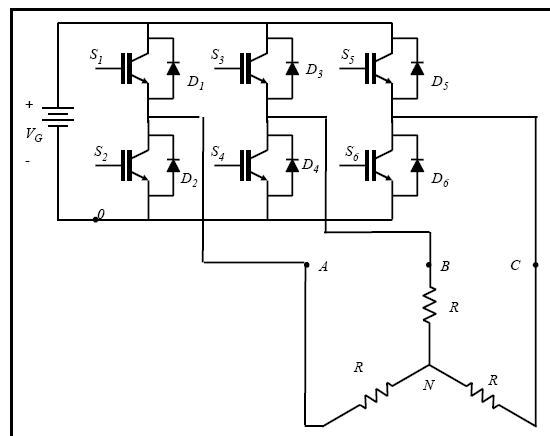


Figura 5.4. Inversor en puente trifásico⁽¹⁾

5.3.-INVERSORES APLICADOS A LA FOTOVOLTAICA

Los paneles solares fotovoltaicos suministran c.c. de tensión y corriente dependiente del flujo luminoso recibido. Normalmente, una instalación de energía solar fotovoltaica autónoma necesita un convertidor c.c./c.c. que optimice la carga de la batería y un inversor autónomo que, a partir de esta, genere corriente alterna monofásica de 230 V, 50 Hz. En las instalaciones no autónomas, pensadas para inyectar energía a la red eléctrica, el inversor puede realizarse con un rectificador controlado que funciona con el flujo de potencia invertido.

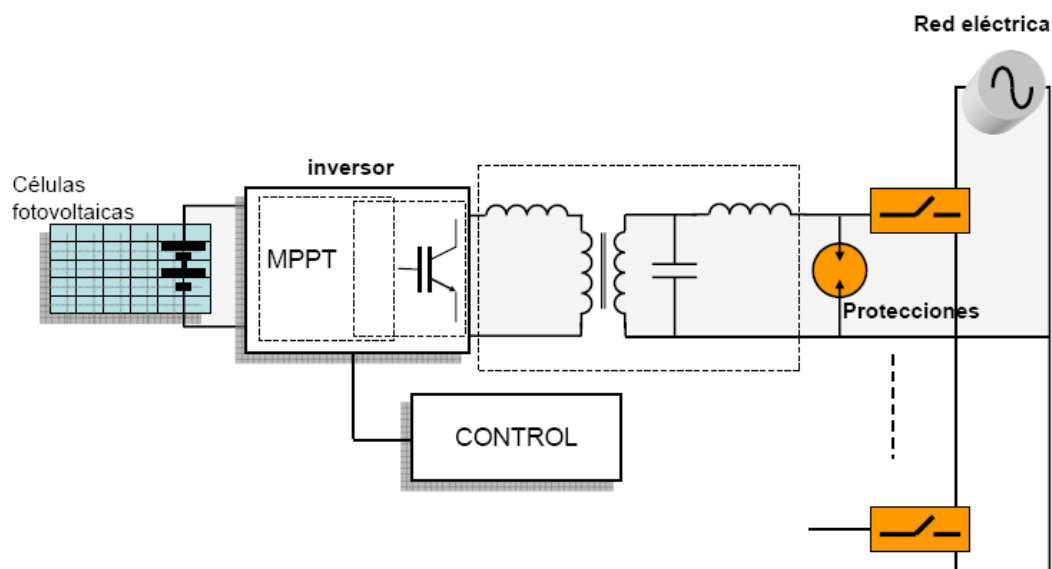
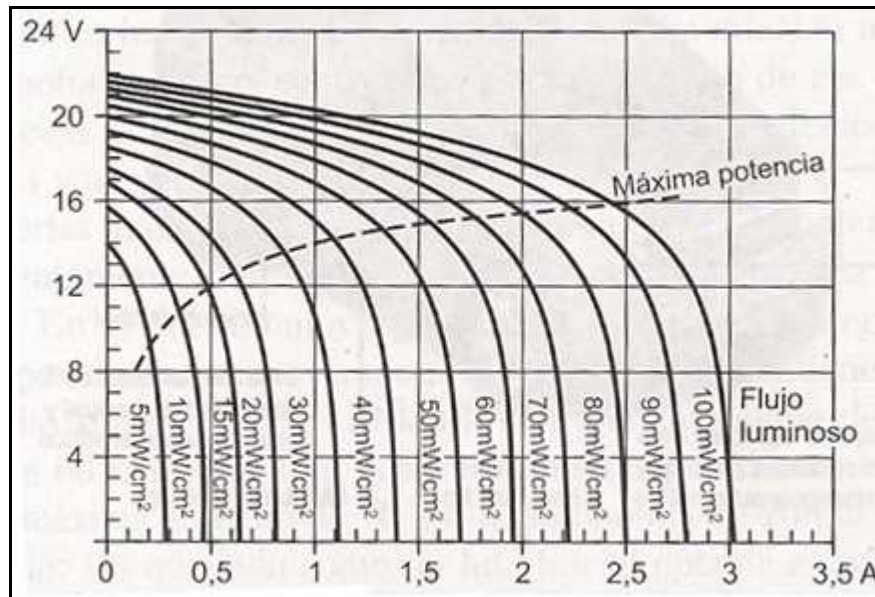


Ilustración 5. 1. Acondicionamiento de potencia para conexión a red de paneles solares fotovoltaicos. ⁽¹⁾

Para cada grado de potencia lumínica recibida por el panel solar, este puede proporcionar pares de tensión intensidad que dibujan su curva característica. El punto de funcionamiento real depende de la carga del panel, en este caso el inversor debe contener un bucle de control que lleve al panel a su punto de máxima potencia entregada por optimizar el rendimiento de la instalación.



Gráfica 5.1. Lugar de los puntos de máxima potencia entregada por un conjunto de células solares fotovoltaicas.
(15)

Existen distintos procedimientos para conseguir el punto de máxima potencia. Entre los clásicos está la modificación de la corriente extraída (elevándola o reduciéndola) detectando simultáneamente si la potencia extraída (producto de tensión-corriente) crece o decrece. Si crece, se continúa la modificación de la corriente en el mismo sentido y si decrece la potencia se modifica la corriente en sentido contrario. El sistema está en estado permanente de búsqueda del punto óptimo, y las modificaciones de corriente se realizan lentamente para no perturbar el funcionamiento del inversor. No es necesaria una velocidad elevada de búsqueda porque las condiciones de insolación de los paneles cambian con tiempos de varios segundos al menos.

5.3.1.-DEFINICIÓN

Los inversores son dispositivos electrónicos que se conectan directamente al generador fotovoltaico, FV, (en su parte DC, entrada) y a la red eléctrica (en su parte AC, salida) y se utilizan para transformar la energía DC producida por el generador FV en energía AC inyectada a la red eléctrica. Además de maximizar la transferencia de energía del generador FV a la red eléctrica mediante elevados rendimientos de conversión eléctrica AC/DC, y de seguimiento del punto de máxima potencia, deben generar energía AC con una determinada calidad (baja distorsión armónica total de la onda de corriente, factor de potencia cercano a la unidad, bajas interferencias

electromagnéticas, baja inyección de corriente DC, etc...). También algunos aspectos básicos relativos a la seguridad de las personas, equipos y red eléctrica están habitualmente incluidos en el inversor. Los últimos desarrollos se han focalizado en un incremento del rendimiento, en operación a potencias máximas y bajas, pero también en incrementar la fiabilidad de operación. Una clasificación general de los inversores puede ser:

- Inversores centrales.
- Inversores modulares o “string inverters”.
- Inversores integrados en módulos fotovoltaicos (módulos AC).
- “Multi-string inverters”.

Este proyecto, se centra en los inversores modulares de baja potencia (<5kW).

5.3.2.-NORMATIVA

Como cualquiera de los componentes de un sistema fotovoltaico, los inversores han de cumplir las normas generales aplicables a este tipo de instalaciones. Algunas ya se han citado en el capítulo correspondiente a Sistemas fotovoltaicos conectados a red.

En este epígrafe se van a resaltar las normas generales y específicas más representativas:

1.NORMATIVA GENERAL

- *Real Decreto 2366/1994 de 9 de diciembre* (sobre producción de energía eléctrica por instalaciones hidráulicas, de cogeneración y otras abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables).
- *Orden del 5 de septiembre de 1985* (por la que se establecen normas administrativas y técnicas para el funcionamiento y conexión a las redes eléctricas de centrales hidroeléctricas de hasta 5000 k VA y centrales de autogeneración eléctrica).
- *Norma ONSE 30.01-248 Instalaciones fotovoltaicas. Condiciones técnicas de conexión a la red de baja tensión* (Norma interna de la Compañía Sevillana de Electricidad).

- *Normativa UNE*, algunos ejemplos: UNE-EN 60891 :1994 procedimiento de corrección con la temperatura y la irradiancia de la característica I-V de dispositivos fotovoltaicos de silicio cristalino (Versión oficial en 60891 :1994). UNE-EN 60904-1:1994 dispositivos fotovoltaicos parte 1: medida de la característica I-V de los módulos fotovoltaicos (Versión oficial en 60904-1 :1993). UNE-EN 60904-2:1994 dispositivos fotovoltaicos parte 2: requisitos de células solares de referencia (Versión oficial en 60904-2: 1993 de circuito abierto. UNE-EN 61727:1996 sistemas fotovoltaicos (FV), características de la interfaz de conexión a la red eléctrica.

2.NORMATIVA APLICABLE A LOS INVERSORES

Las normas básicas que han de cumplir los inversores en España son las siguientes:

- *R.D. 1663/2000*: se recogen, entre otros aspectos, el procedimiento de inclusión de una instalación de producción de energía eléctrica en el régimen especial, su régimen económico o las condiciones de entrega de la energía eléctrica producida en esas instalaciones.
- *Marcado de CE*: si los productos están sujetos a varias directivas, todas las cuales establecen el marcado CE, el marcado indica que se presume que los productos son conformes con las disposiciones de todas estas directivas.
- *REBT*: los inversores forman parte de una instalación de baja tensión, así pues han de cumplir las normas dictaminadas por el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (España).
- *IEEE 929-2000*: norma referida al diseño y tipo de conexión de los inversores.
- *IEC 61727*: norma donde se explica como ha de ser la conexión entre el generador fotovoltaico y el inversor.
- *UL 1741*: se recogen aspectos relacionados con inversores, convertidores, controladores y Sistema de Interconexión Equipo para uso con distribución de los recursos de la Energía.
- *IEC 60364-7-712*: reglas para las instalaciones y emplazamientos especiales.⁽¹⁷⁾



Capítulo 6:

RENDIMIENTO

6.1.-RENDIMIENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

En este epígrafe se va a tratar de profundizar más en el desarrollo del proyecto. El estudio comparativo de los inversores se centra en el rendimiento. Este parámetro es fundamental para definir un inversor como adecuado y poder compararlo con otros que presenten características similares. Los inversores han de trabajar con el máximo rendimiento de conversión eléctrica DC/AC, además, han de generar energía con una determinada calidad (baja distorsión armónica, elevado factor de potencia y bajas interferencias electromagnéticas). También han de cumplir la normativa de seguridad para personas, equipos y la red eléctrica. Los inversores fotovoltaicos (FV) de conexión a red operan directamente conectados al generador FV, por lo que habitualmente disponen de seguimiento del punto de máxima potencia, SPMP, del generador FV con el objeto de optimizar el grado de aprovechamiento de la energía potencial producida por dicho generador.

6.2.-RENDIMIENTO DE UNA CÉLULA SOLAR

Se define el rendimiento o eficiencia (η) de una célula solar como el cociente entre la potencia máxima que puede dar a la carga y la potencia luminosa recibida por la célula.

$$\eta = \frac{V_{mp} \cdot I_{m p}}{P_L} \quad \text{Ecuación 6.1. Ecuación teórica del rendimiento de una célula solar}^{(9)}$$

PL: potencia luminosa recibida por la celda.

Un dato importante a tener en cuenta es que al nivel del mar, en un día claro y con sol en el cenit, la potencia luminosa recibida del sol por metro cuadrado es aproximadamente de 1Kw.

El rendimiento de las células fotovoltaicas que se comercializan actualmente está comprendido entre un 15% y un 25%, es decir, sólo una pequeña parte de la energía lumínica se aprovecha realmente en forma de energía eléctrica. Este rendimiento es menor cuanto más alta es la temperatura.

El aumento de la temperatura en las células supone un incremento en la corriente, pero al mismo tiempo una disminución mucho mayor, en proporción, de la tensión. El efecto global es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura del trabajo del mismo. Una radiación de 1000W/m^2 es capaz de calentar un panel al menos 30° por encima de la temperatura del aire circulante, lo que reduce la tensión en $2\text{ mV}/(\text{célula} \times \text{grado}) \times 36\text{ células} \times 30\text{ grados} = 2,16\text{ mV}$ y por tanto, la potencia en un 15%.⁽⁹⁾

Otros factores que afectan el rendimiento de una célula fotovoltaica (solar):

- *Energía de los fotones incidentes:* para generar los pares electrón-hueco es necesario que los fotones que llegan a la célula tengan una determinada energía. En la radiación solar, una parte de los fotones incidentes no tiene esa energía por lo que se pierden, y otros tienen una energía mayor, por lo que se pierde el exceso.

- *Pérdidas por recombinación:* el proceso de recombinación depende de los defectos de la estructura cristalina del semiconductor, cuanto más puro sea (silicio monocristalino), éstas pérdidas serán menores.

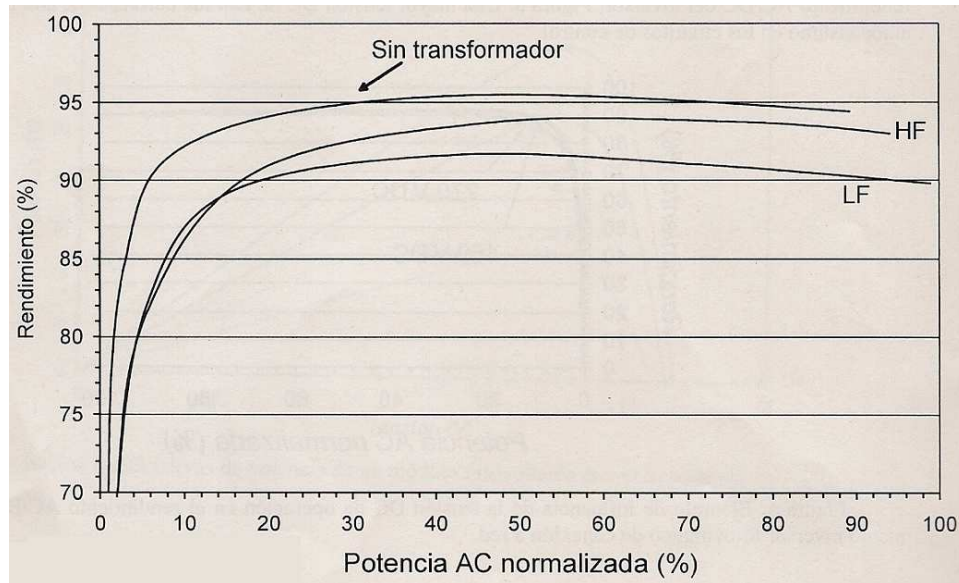
- *Resistencia serie:* La resistencia serie es una característica muy importante ya que disminuye el factor de forma y, por lo tanto, la eficiencia de la célula. Esa resistencia se debe a que los electrones generados en el semiconductor que alcanzan la zona “n” superficial, han de correr por la superficie hasta alcanzar una tira metálica de la rejilla. La resistencia serie es menor cuanto más profunda sea la zona “n” y cuanto mayor sea la superficie metálica de la rejilla, pero entonces la superficie del semiconductor sobre la que incide la luz solar es menor (mayor sombra) y el valor de la tensión a circuito abierto es también más pequeño, por lo que hay que buscar un compromiso a la hora del diseño de la célula. Esta resistencia además disipa energía por efecto Joule, al circular la corriente por ella, en forma de calor y que debe disipar la célula.

- *Pérdidas por reflexión parcial:* Parte de la luz que incide sobre la célula es reflejada por la superficie de esta, por lo que se pierde. Para evitar esta pérdida, en la fabricación de las células se emplean capas antirreflectantes y superficies rugosas.

6.3.-RENDIMIENTO AC/DC DE LOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS

Sin duda alguna, el rendimiento de conversión AC/DC es el parámetro más representativo de los inversores. Además de por su diseño y características constructivas, el rendimiento AC/DC de los inversores fotovoltaicos de conexión a red viene determinado por la utilización o no del tipo de transformador de aislamiento galvánico AC/DC. Acostumbra a ser un requerimiento de la normativa, por ejemplo RD 1663/2000, el que los inversores de conexión a red dispongan de aislamiento galvánico (o equivalente) entre la red y la instalación fotovoltaica. Este aislamiento galvánico puede realizarse mediante transformadores de baja frecuencia (LF) o mediante transformadores de alta frecuencia (HF). El aislamiento galvánico AC/DC tienen una influencia significativa no sólo en el rendimiento de inversores, sino también en su peso (más pesados los LF que los HF) y facilidad de instalación. Los inversores con transformador en LF pueden alcanzar un rendimiento típico máximo del 92%, mientras que los que utilizan aislamiento HF pueden llegar al 94%. Estas dos conclusiones se podrán consolidar en el capítulo de resultados, ya que contamos con inversores de varias clases. ⁽⁵⁾

La omisión de transformador de aislamiento galvánico puede incrementar el rendimiento en un 2%, siendo un caso que generalmente no es aceptado por las normativas locales. La utilización de un mayor número de componentes electrónicos en el diseño interno de inversores con aislamiento en HF puede tener efectos negativos en la fiabilidad de los mismos, necesitando además en algunos casos elementos adicionales de verificación de ausencia de inyección de componente continua en la red eléctrica, que siempre es evitada mediante la utilización de un transformador de aislamiento de baja frecuencia. ⁽¹⁹⁾



Gráfica 6.1. Curvas de rendimiento-potencia AC (normalizada a la potencia nominal) típicas de inversores con transformador de alta frecuencia (HF), baja (LF) y sin transformador para inversores de potencia nominal $<1.5\text{kW}^{(19)}$

6.4.-PERFORMANCE RATIO

El rendimiento global, o performance ratio, se utiliza ampliamente en el mundillo fotovoltaico como indicador de calidad de los sistemas desde que, en 1993, fuese incluido en un estándar de IEC. Este parámetro se define como la relación entre la energía de un sistema FV vende realmente a la red, y la que vendería un hipotético sistema fotovoltaico ideal, entendido como una cuyas células solares trabajasen siempre a la temperatura de referencia (25°C) y que, por lo demás, estuviese totalmente libre de pérdidas. Es fácil ver que la energía asociada a este ideal es igual a la potencia nominal multiplicada por la irradiación incidente a lo largo del año y dividida por la irradiancia de referencia (1000W/m^2).⁽²⁰⁾

Por su propia definición, el valor del PR depende de parámetros como la temperatura ambiente (que influye en la eficiencia de los dispositivos FV, y en consecuencia, en la determinación de su denominador) o las sombras (que influyen en la irradiación incidente), y en consecuencia, en la determinación del denominador) que lo hacen variar a lo largo del año.

Para finalizar, cabe destacar que los valores que determinan que un sistema fotovoltaico es muy bueno son aquellos que superan el 0.75, mientras que valores inferiores apuntan a que los sistemas dejan algo que desear.

6.4.-RENDIMIENTO EUROPEO

Como ya se ha citado anteriormente, el rendimiento de conversión eléctrica, η_{inv} , se define como:

$$\eta_{inv} = \frac{P_{AC}}{P_{Dc}} \quad \text{Ecuación 6.2. Rendimiento de conversión eléctrica}^{(21)}$$

Habitualmente se define un rendimiento normalizado, denominado rendimiento europeo, η_{EU} , válido para climas europeos, en función del rendimiento a distintos porcentajes de potencia de operación, respecto a la potencia nominal.

$$\eta_{EU} = 0.03\eta_{5\%} + 0.06\eta_{10\%} + 0.13\eta_{20\%} + 0.1\eta_{30\%} + 0.48\eta_{50\%} + 0.2\eta_{100\%} \quad \text{Ecuación 6.3. Rendimiento europeo}^{(21)}$$

Donde, por ejemplo $\eta_{10\%}$ es el rendimiento del inversor cuando opera a un 10% de la potencia nominal.

El rendimiento europeo puede ser un descriptor apropiado para sistemas FV instalados a un ángulo fijo bajo condiciones climáticas generales, como es nuestro caso. También es un parámetro que ha sido ampliamente aceptado por la comunidad FV internacional y que la mayor parte de los fabricantes de inversores incluyen en sus datos técnicos.

Sin embargo, tanto las condiciones climáticas específicas de cada localidad, como el seguimiento solar pueden influenciar en el rendimiento energético. En estos casos, puede definirse el rendimiento europeo como el rendimiento energético calculado para un mismo inversor de referencia, para diferentes localidades y diferentes estrategias de seguimiento solar. Nótese como el rendimiento energético es superior para seguimiento solar y que varía de unas localidades a otras.

6.5.-RENDIMIENTO CALIFORNIANO.

Otro parámetro representativo de la eficiencia, que también se incluye en los manuales es el rendimiento californiano, muy parecido al rendimiento europeo, ya que depende, también, de los valores porcentuales que toma el rendimiento según ciertos niveles de potencia nominal. Es una nueva muestra de certificar la calidad del inversor.

En el proyecto se compararan inversores apoyándose tanto en el rendimiento europeo como en el californiano. La ecuación de este último es la siguiente:

$$\eta_{CA} = 0.04\eta_{10\%} + 0.05\eta_{20\%} + 0.12\eta_{30\%} + 0.21\eta_{50\%} + 0.53\eta_{75\%} + 0.05\eta_{100\%}$$

Ecuación 4. Rendimiento californiano⁽²¹⁾

6.6.-NUEVOS MÉTODOS DE AUMENTAR EL RENDIMIENTO

Actualmente existe un enorme interés a nivel mundial en el desarrollo de la tecnología fotovoltaica, un hecho que está impulsando activamente a la investigación de nuevos productos y la innovación, lo que asegura un continuo crecimiento de esta industria.

Algunos ejemplos de estos progresos son:

- *Concentradores solares y tintes orgánicos*: están basados en recubrimiento en tintes orgánicos, no necesitan equipo de rastreo ni procesos de enfriamiento, lo que reduce el coste general.



Imagen 6. 1. Capas de tinte orgánico⁽²²⁾

- *Célula solar multi-unión*: bajo luz solar concentrada, consigue una eficiencia de hasta el 37,6%.
- *Concentradores luminiscentes*: sofisticado y económico prototipo creado por el Instituto de tecnología de Massachussetts que abarataría en un 30% la producción de electricidad a partir de energía solar.

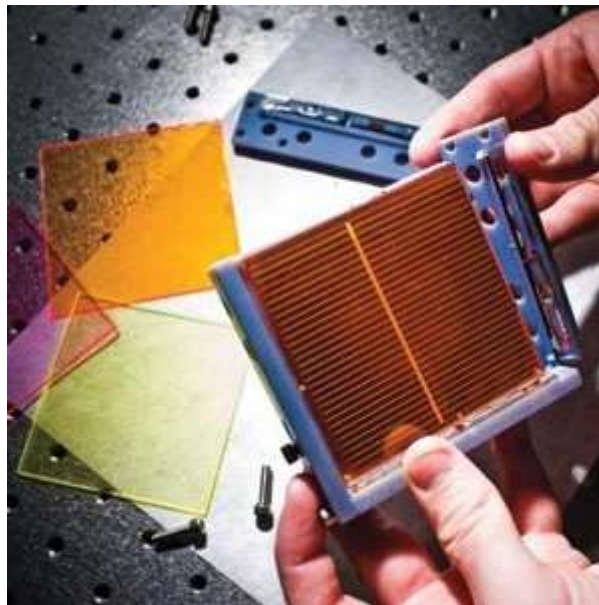


Imagen 6.2. Concentrador solar⁽²⁴⁾

- *Generadores solares que funcionan todo el día*: producto de combinar un catalizador líquido con células fotovoltaicas para conseguir un sistema de energía solar capaz de generar 24 horas del día.
- *Células solares tintadas más sensibles*: usando un diseño semejante a la estructura en forma de esferas porosas parecidas a las palomitas de maíz, este nuevo método mejora impresionantemente en las células solares de bajo costo que se desarrollan actualmente en laboratorios. Multiplican por dos la eficiencia de conversión eléctrica.⁽²⁴⁾

Capítulo 7: DISPOSICIÓN DE ELEMENTOS UTILIZADOS

7.1.-DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Como ya se ha comentado anteriormente, el sistema fotovoltaico utilizado en este proyecto es del tipo conectado a red. Los elementos utilizados se pueden dividir en dos subgrupos:

- *Elementos del sistema FV:* son los componentes propiamente dichos. Los paneles fotovoltaicos, el inversor y la red eléctrica.
- *Instrumentación de medida:* la célula que capta y mide la irradiancia, el vatímetro y el PC.

Se han realizado medidas de la entrada (DC) y salida (AC) del inversor al mismo tiempo. También se han adquirido las formas de onda de corriente y tensión a la salida, del inversor. La medida de los parámetros DC (tensión y corriente) y AC (tensión, corriente, potencia activa, factor de potencia y frecuencia) se ha realizado utilizando el vatímetro. En apartados posteriores, se especificarán modelos, características y formas de medida de cada elemento.

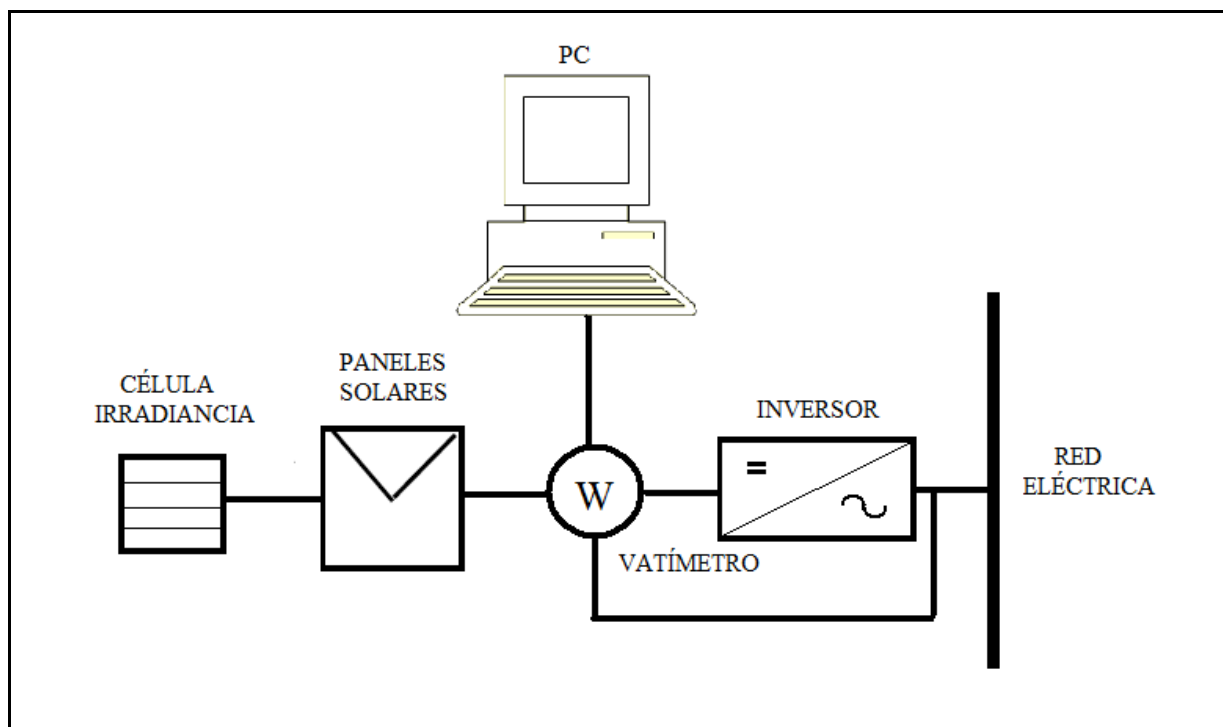


Figura 7.1. Esquema de conexiones

7.1.1.-LOCALIZACIÓN

La Universidad Carlos III de Madrid, en el campus de Leganés, posee un gran número de modelos de paneles fotovoltaicos. Todos ellos situados en la azotea del edificio Betancourt (en la figura 2 está denotado con el número 1). La razón de la colocación de módulos solares en este lugar se debe, fundamentalmente, a la existencia casi nula de sombras, ya que no hay edificios de gran altura alrededor ni árboles que lo superen. Además, la superficie es horizontal y de fácil acceso. Su cercanía a los laboratorios lo hace un edificio ideal para este tipo de estudios.

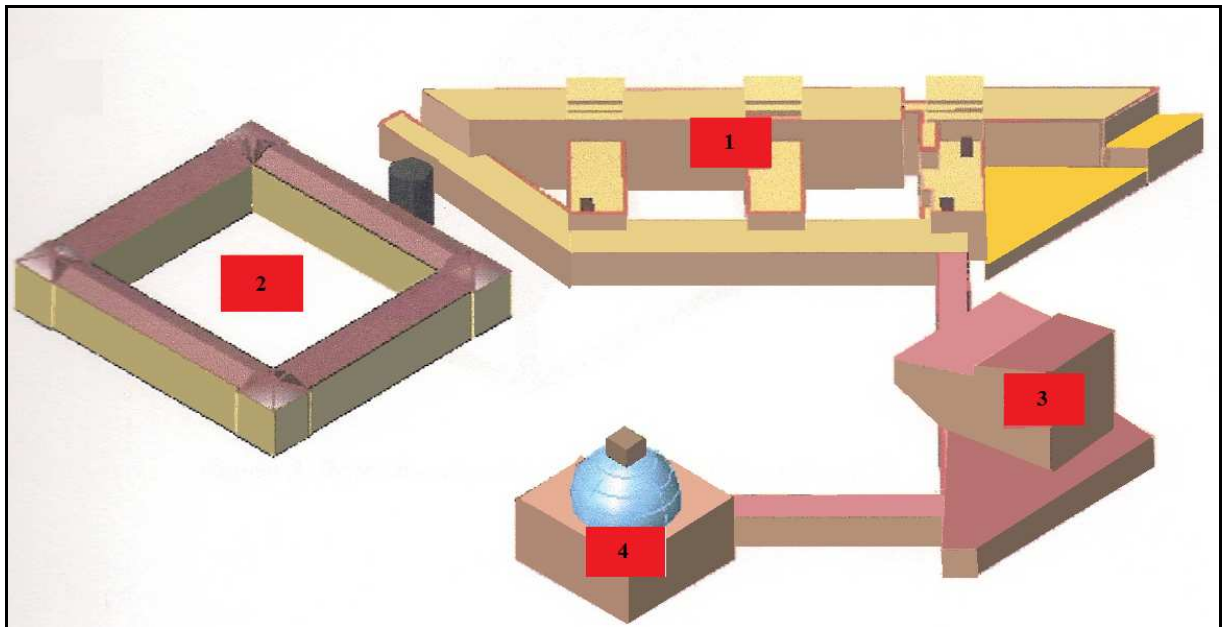


Figura 7.2.Representación 3D del edificio Betancourt y edificios colindantes.

Para la realización de este proyecto se han escogido unos paneles sin seguidor, es decir, paneles fijos, debido a su cómoda instalación y a que, al realizarse en los meses de verano (exactamente, Junio y Julio), cuando la irradiancia solar es mayor, las diferencias en los resultados entre paneles con y sin seguidor serían ínfimas. En la tabla siguiente se adjuntan los valores medios de la irradiación en Madrid de cada mes del año.

Mes	$G_{dm}(0)[kWh/m^2 * dia]$
Enero	1,92
Febrero	2,52
Marzo	4,22
Abril	5,39
Mayo	6,16
Junio	7,12
Julio	7,48
Agosto	6,60
Septiembre	5,28
Octubre	3,51
Noviembre	2,09
Diciembre	1,67

Tabla 1. Datos de la irradiación en Madrid⁽⁵⁾

Las terrazas del edificio Betancourt están orientadas 30° hacia el este, medidas con respecto al Sur. La superficie es totalmente horizontal: en nuestra latitud, la inclinación óptima es hacia el sur. Sin embargo, lo que se deja de generar por estar orientados hacia el sureste o suroeste sólo representa un 0,2% por cada grado de desviación respecto al sur (en este caso es cerca del 15%). La inclinación óptima de los módulos depende de la latitud del lugar donde se van a instalar, a grandes rasgos podemos decir que es entre 5° y 10° menos que la latitud; y la época del año en la que se quiere maximizar la producción óptima, en el caso de Leganés es de 35° . La localización exacta de este sistema viven representada en la siguiente figura:

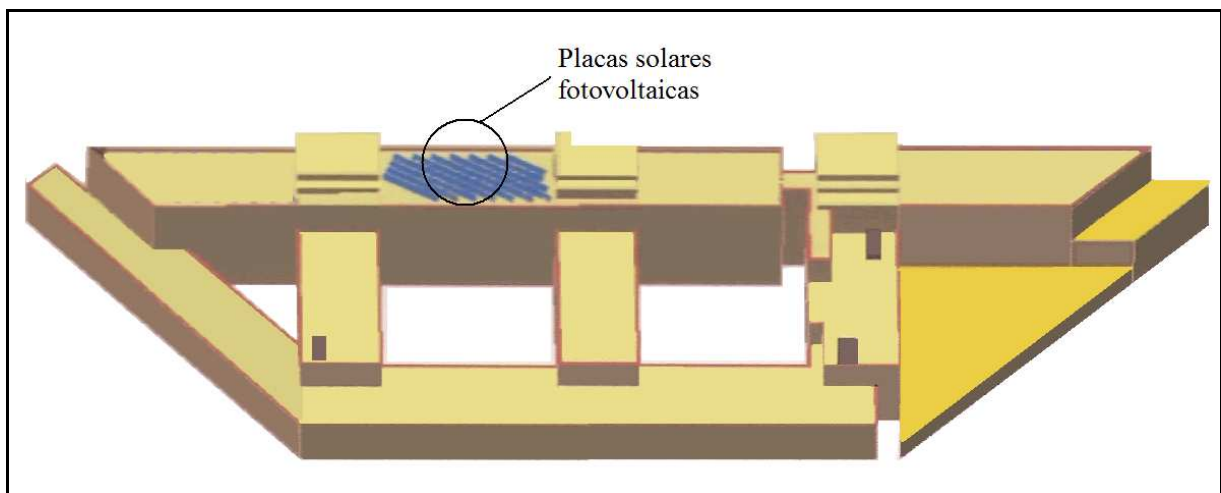


Figura 7.3. Instalación azotea de edificio Betancourt.

Los dispositivos de medida se encuentran todos en el laboratorio de la segunda planta del mismo edificio, perteneciente al departamento de electrónica de potencia.

7.2.-DESCRIPCIÓN DE LOS PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS.

A la hora de realizar el estudio del rendimiento de los inversores disponibles, se tuvo en cuenta la potencia que estos eran capaces de inyectar a la red eléctrica. Por esta razón, el número de paneles fotovoltaicos seleccionados ha sido de un total de cuatro ($190\text{W} \times 4 = 760\text{W}$ de potencia de entrada). Los cuatro se encuentran conectados en serie y no poseen seguidor solar, es decir, es un sistema fijo.

Las placas utilizadas son de la marca SANYO, modelo MIP_190BE3.



Figura 7.4. Panel SANYO MIP_190BE3

7.2.1.-CARACTERÍSTICAS GENERALES.

- Las células solares de estos paneles están formadas por obleas finas de monosilicio cristalino, rodeadas de monosilicio amorfo ultrafino.
- El rendimiento máximo por célula es de 18.5% y el del panel 16.1%

- El ancho de la célula (200µm) es inferior al de otros paneles (350 µm).
- Cumple la norma ISO 9001 y los estándares 14001.

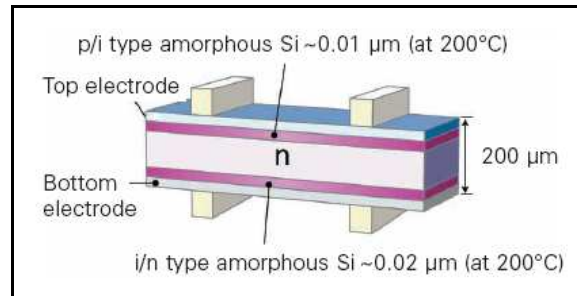
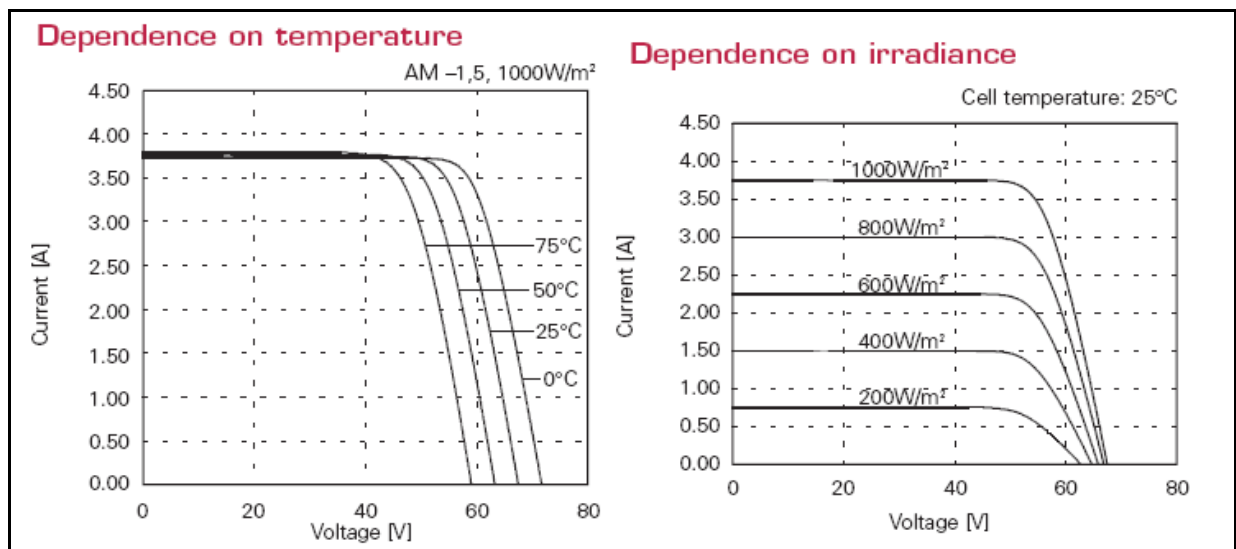


Figura 7.5. Estructura de la célula solar del panel SANYO

7.2.2.-CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y ELÉCTRICAS.

- Peso: 15 Kg.
- Pmax: 190W.
- Máximo Voltaje del sistema: 760V.
- Mínima Pmax: 180.5W

Todos los valores medidos para condiciones normales de irradiación y temperatura (1000 W/m², 25° C).



Gráfica 7.1. Curvas de funcionamiento del panel solar SANYO

7.3.-CÉLULA CALIBRADA COMPENSADA.

Este dispositivo es uno de los elementos de medida del sistema fotovoltaico. Se utiliza para conocer la radiación solar que incide en el plano en el que está colocada que, normalmente, coincide con el del campo fotovoltaico. Es de silicio monocristalino y está encapsulada del mismo modo que los módulos. En la parte posterior posee una caja de la cual sale un cable bipolar con el positivo y negativo marcados, y una etiqueta que proporciona el valor exacto de la calibración.



Figura 7. 6.Célula calibrada ATERSA

La célula escogida es de la marca ATERSA, de número de serie 06050086. Permite configurar sus salidas como:

- *Configuración 1:* Dos salidas de señal de 65mV DC redundantes, independientes y eléctricamente aisladas (para detectar obstáculos de suciedad en el cristal). $65\text{mV DC} = 1000\text{W/m}^2 \pm 2,1\%$
- *Configuración 2:* Una salida de 100mV DC. $100\text{mV DC} = 1000\text{W/m}^2 \pm 2,2\%$.

En nuestro caso, la salida de la célula está configurada de forma que la equivalencia es del tipo: $65\text{mV DC} = 1000\text{W/m}^2 \pm 2,1\%$.

7.4.-INVERSOR

Es el elemento más importante dentro de este estudio, por tanto, la descripción será más detallada. El comportamiento de convertidores de potencia, inversores y el reguladores de carga son determinantes de la fiabilidad y rendimiento de un sistema fotovoltaico completo. De poco sirven las mejoras en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos si no se optimiza el sistema de acondicionamiento de potencia de la instalación. El inversor es el dispositivo electrónico que transforma la corriente continua proveniente de las baterías o del panel fotovoltaico en corriente alterna.

7.4.1. INVERSOR STECA GRID 300

Se trata de un inversor senoidal diseñado específicamente para energía solar. Utiliza modulación PWM con puente completo. Cumple las especificaciones vigentes sobre contenido de armónicos y compatibilidad EMI y RFI. Está protegido contra cortocircuito, sobrecarga y sobrecalentamiento. Una mayor potencia de entrada y/o una mayor corriente disponibles no se utilizan.



Figura 7.7. Inversor Steca Grid 300

El diseño de este tipo de inversor permite unir en serie un número limitado de paneles solares, los cuales forman un string, que se conectan posteriormente a un solo inversor. Es posible, también, conectar varios inversores para inyectar electricidad en la red.

La principal ventaja de este concepto es que así se pueden evitar problemas de sombras e incompatibilidades, con lo que se generan altos rendimientos unidos a una mayor flexibilidad y fiabilidad. Un solo inversor puede conectarse a un string de entre dos y seis módulos. Se puede juntar un cierto número de MiniStrings hasta formar un sistema del tamaño deseado. StecaGrid 300 puede usarse en cualquier combinación con hasta 3.600 vatios de CA.

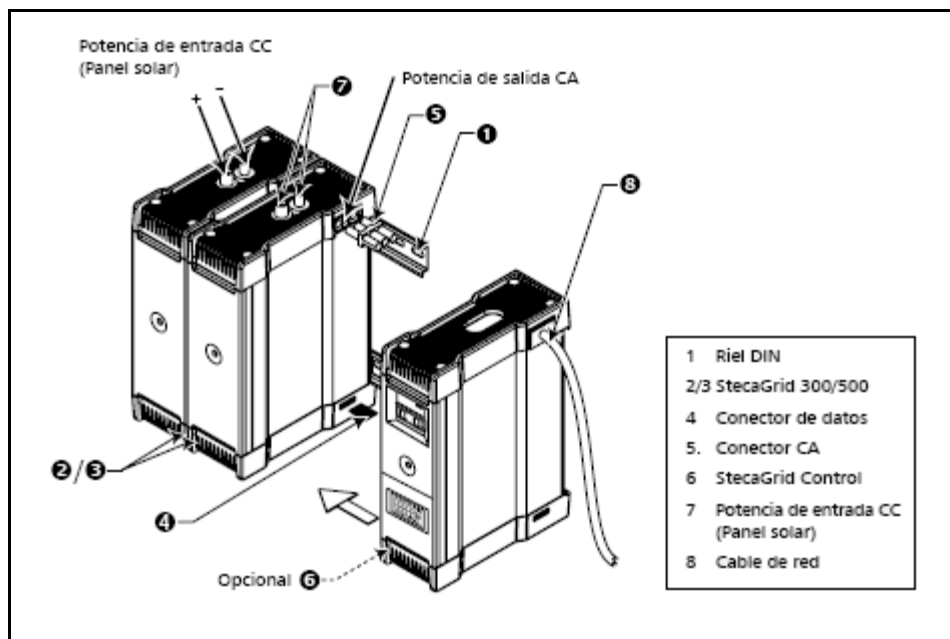


Figura 7. 8. Modulador del inversor Steca Grid 300

Se emplea un microprocesador sumamente potente para alcanzar el punto de potencia máxima en cualquier situación.

Los componentes electrónicos han sido diseñados para alcanzar una vida útil estimada en al menos 30.000 horas a la potencia máxima (esto equivale a 20 años de vida útil).

Este tipo de inversor no posee separación galvánica, por lo que el rendimiento que alcanza es mayor que en otro tipo de inversores que si lo poseen. Este dato es fundamental para la comparativa entre inversores, en el capítulo de Resultados se encuentran los detalles de este tipo de diseño.

Es posible añadir al inversor un dispositivo de control, con características de seguridad adicionales.

7.4.1.1.-CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y MECÁNICAS.

Los valores más descriptivos de este inversor son:

- *Rango de tensión de entrada:* 45V a 135V
- *Potencia nominal:* 300W
- *Tensión nominal de salida:* 230V
- *Frecuencia de red:* 50Hz
- *Máximo coeficiente de rendimiento:* 94.8%
- *Coeficiente de rendimiento europeo:* 93.4%
- *Peso:* 1.4Kg
- *Rango de temperatura ambiente:* IP 20 (interior)
- *Rango de temperatura ambiente:* -20°C a 45°C

El grado de protección IP de la carcasa del inversor es un parámetro muy distintivo. Aquellos inversores con grado entorno IP65, pueden instalarse directamente en condiciones de intemperie, otros con menor graduación, como es el caso del Steca Grid 300, están diseñados para ser instalados en interior o en cajas de protección adecuada.

7.4.1.2.-PUESTA EN SERVICIO Y MANEJO

El sistema fotovoltaico se pone en marcha automáticamente, si la intensidad de la luz es suficiente, el inversor se pone en modo activo. En este estado, el led permanece iluminado, por tanto, la energía está siendo inyectada a la red eléctrica.

El inversor funciona automáticamente, si se dispone de suficiente luz solar, como ya se ha dicho, el inversor está en estado activo. Si el nivel de energía solar es bajo, el inversor se pone en modo “*Standby*”, a la espera de que el nivel suba (el led parpadea). En el momento que no hay luz solar o esta es insuficiente, el inversor pasa a estado apagado. En este modo no se consume corriente alguna de la red.

7.4.2.-INVERSOR SUNNY BOY 1100.

Se trata, como en el caso del Steca Grid 300, de un inversor senoidal diseñado específicamente para energía solar. Utiliza modulación PWM con puente completo. Cumple las especificaciones vigentes sobre contenido de armónicos y compatibilidad EMI y RFI. Está protegido contra cortocircuito, sobrecarga y sobrecalentamiento.



Figura 7.9.Sunny Boy 1100

En este caso, no es posible conectar strings de paneles solares a un conjunto de inversores conectados. Para la realización de este tipo de montaje, la marca Sunny Boy dispone de otro modelo de inversor, el Sunny Boy Multi-String.

Todas las conexiones del inversor se realizan en la parte inferior del mismo. La conexión de CA puede realizarse por un conector de CA o introduciendo el cable de conexión por una abertura en el inversor para conectarlo a los bornes de CA. En nuestro caso, la conexión es esta última. El tipo de conexión continua es MC3.

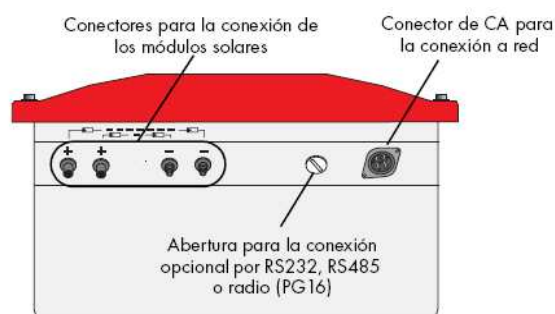


Figura 7.10. Conexionado del modelo SB1100

Al contrario que el Steca Grid 300, el Sunny Boy 1100 posee separación galvánica, por lo tanto la protección a la red es mayor (no meterá armónicos indebidos ni picos de tensión y corriente).

El SB1100 posee protección contra polarización inversa, seccionador de carga de CC ESS, resistencia al cortocircuito y monitorización de toma de tierra y de red.

El inversor está en constante proceso de comprobación de que las condiciones de inyección a red son las adecuadas. Disponen de uno o varios (según el modelo) controladores de MPP, en el caso del SB1100 es de uno.

Es posible instalar una monitorización del sistema con un programa de PC donde se puede configurar un sistema de monitorización a la medida de cada sistema fotovoltaico.

7.4.2.1.-CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y MECÁNICAS.

Los valores más descriptivos de este inversor son:

- *Rango de tensión de entrada:* 139V a 320V
- *Número máximo de strings (en paralelo):* 2
- *Potencia nominal:* 1000W
- *Tensión nominal de salida:* 220V-230V
- *Frecuencia de red:* 50Hz / 60 Hz
- *Factor de potencia:* 1
- *Conexión de CA:* monofásica
- *Máximo coeficiente de rendimiento:* 93.0%
- *Coeficiente de rendimiento europeo:* 91.6%
- *Peso:* 22Kg
- *Rango de temperatura ambiente:* IP 65 (interior y exterior)
- *Rango de temperatura ambiente:* -20°C a 45°C

7.4.2.1.-ESTADOS Y FUNCIONAMIENTO.

Los distintos estados y funcionamientos del inversor están indicados por tres diodos luminosos (led's) situados en la tapa de la carcasa del inversor y por el display integrado. Para que los tres led's puedan indicar un estado de funcionamiento, el inversor debe estar conectado por el lado de C.C. Para asegurar que el inversor disponga de suficiente tensión continua, será necesario un mínimo de irradiación solar.

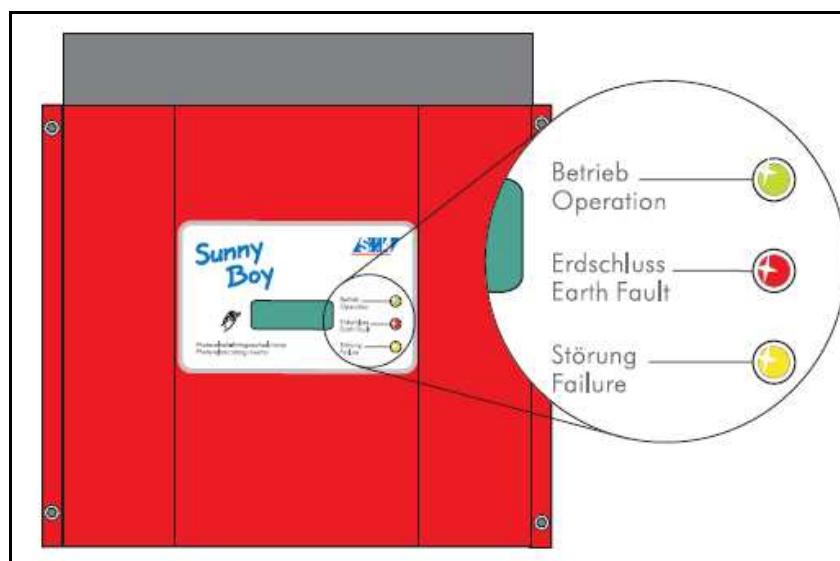


Figura 7.11. Led's indicadores del funcionamiento del SB1100

En el estado de funcionamiento normal los led's están apagados o sólo está iluminado el verde (de forma permanente o parpadeante). Si se produce una tensión del generador fotovoltaico demasiado alta, el led amarillo parpadeará. Cualquier otro tipo de anomalía que no suponga peligro inminente para las personas o equipos presentará los restantes posibles códigos.

7.5.- VATÍMETRO

Es el dispositivo de medida principal, se ha escogido el vatímetro de última generación de la marca ZES ZIMMER, modelo LMG 500. Consta de una serie de características que no poseen los vatímetros convencionales, ya que es capaz de medir en tiempo real numerosos datos. Tienen múltiples funciones dentro de los campos de medición de inversores, fuentes de alimentación conmutadas, equipos de luces y electrónica de potencia en general. Con una duración de pulso de menos de 100ns.



Figura 7.12. Vatímetro LMG 500

El vatímetro LMG 500 tiene de uno a ocho canales, todos ellos aislados, con inmunidad a las interferencias. Posee entradas y salidas tanto analógicas como digitales, con entradas adicionales para los sensores de corriente. En relación con este tipo de sensores, posee un auto-escalado para compensar dichos sensores en fase y amplitud.

A parte de realizar mediciones de tensiones, corrientes, potencias, rendimientos, etc. mide también armónicos e interarmónicos con gran fidelidad. Puede llegar a medir el interarmónico 99.

Otro rasgo característico es que posee un interfaz para PC, del que hablaremos en un epígrafe posterior. Aunque desde el propio vatímetro se pueden realizar análisis de los datos almacenados, e incluso pasarlos a dispositivos de memoria portátil, ya que posee puerto USB. A través de la pantalla gráfica a color se muestran los valores medidos, formas de onda, diagramas de valores calculados, gráficos de barras e incluso diagramas vectoriales (diagramas de Fresnel). Posee, también un editor de fórmulas. De hecho, es a partir de este editor, con el que se han conocidos los valores reales de la irradiancia, ya que los valores que proporciona la célula calibrada compensada son en mV. A partir de un simple algoritmo introducido en el vatímetro, hemos realizado la conversión a W/m^2 .

El interfaz de uso es bastante sencillo e intuitivo, en la cara principal cuenta con un rodillo y una serie de teclas para manejarse por dicha interfaz.

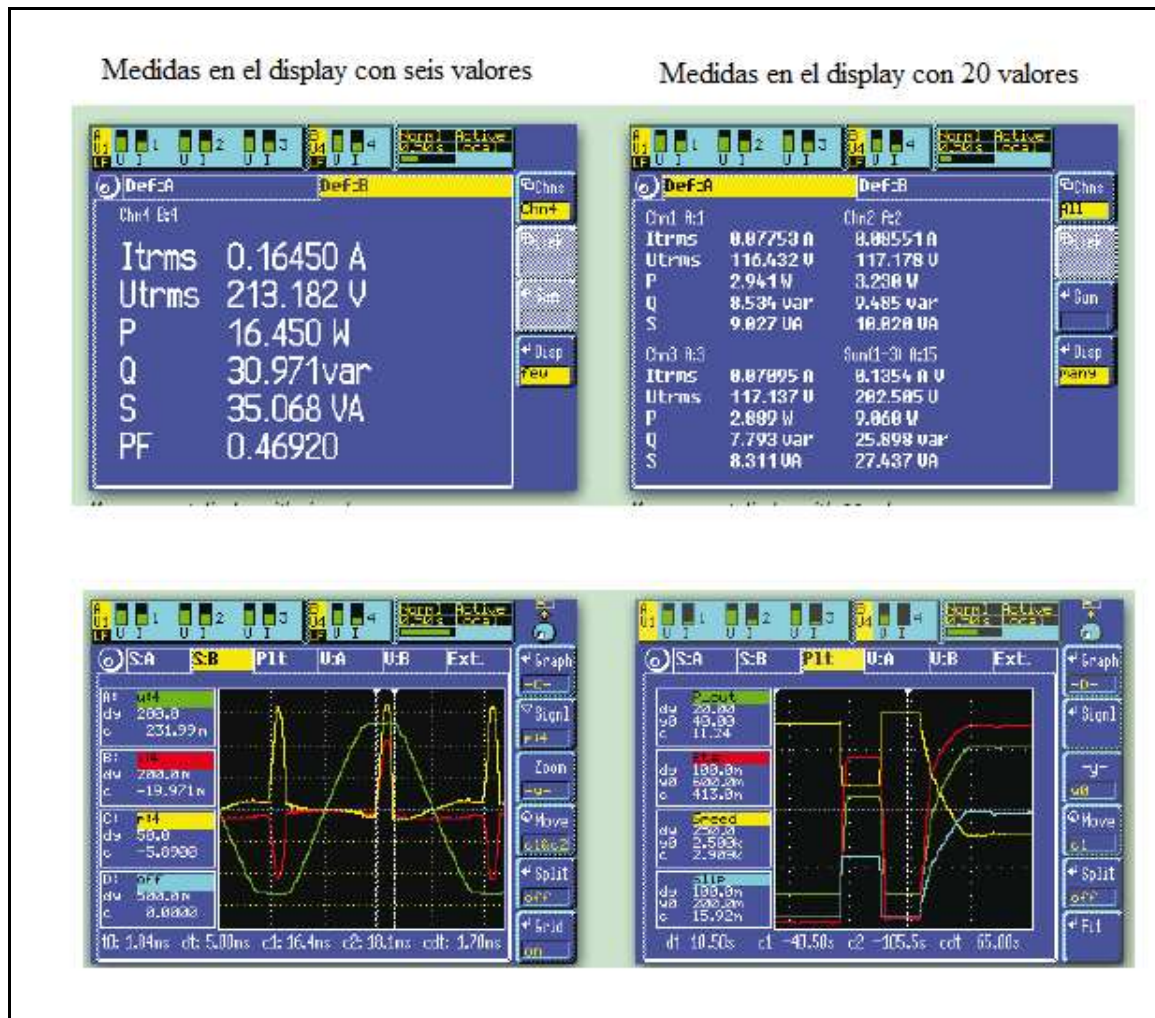


Figura 7.13. Pantallas con distintas mediciones y gráficas del vatímetro LMG 500

Este dispositivo, no solo es un dispositivo de medida, si no que, gracias a sus características tecnológicas es capaz de aportar asistencia a la hora de alcanzar el punto de máxima potencia, necesario para un correcto funcionamiento del inversor en cuestión y de la obtención del máximo rendimiento posible.

La exactitud a la hora de dar los valores es, nominalmente del 0.03%. Esto implica que el rango de medidas es muy amplio, por ejemplo, en corrientes va desde los 20mA hasta los 32 A, mientras que en tensiones va desde 3V a 1000V.

Los ocho canales disponibles están agrupados de dos en dos, por ello, en el display aparecen numerados del uno al cuatro. Nosotros hemos utilizado para medir los valores a la entrada del inversor (corriente continua) el canal 1 del vatímetro, mientras que para medir la salida del inversor (corriente alterna) hemos utilizado el canal 3.



Figura 7.14. Muestra de los consola del vatímetro

Por cada canal, se observa en la figura anterior, que hay dos entradas, la corriente y la tensión.

7.6.-SOFTWARE

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, el vatímetro utilizado es capaz de almacenar datos y realizar gráficas y funciones a partir de estos. Pero si se quieren realizar medidas específicas y almacenarlas dentro de un PC, se hace necesario contar con la ayuda de un software especializado. El vatímetro ZES ZIMMER LMG 500 cuenta con un programa para PC, este programa se llama LMG control. La última versión se puede descargar directamente desde la página del fabricante.

A parte de controlar los datos medidos mediante el PC, se necesitaba un programa capaz de procesar el gran número de datos aportados por el vatímetro, se esta hablando de valores desde 1000 datos hasta los 5.000.000. Para ello, programas como el Excel que nos ofrece Microsoft Office, se quedaba corto, así que, tras una investigación entre todos los nuevos softwares, se encontró el programa Origin 7.0, una hoja de cálculo capaz de procesar casi infinitos datos.

7.6.1.-LMG control

La versión usada de este programa es la número 11. Con este software especializado y específico para el correcto y satisfactorio uso del vatímetro LMG 500, se puede controlar el vatímetro, tanto en la forma de medir, en la frecuencia de medida, los modos de medida...

Con este programa se puede ver en tiempo real los valores con una frecuencia desde los 100ns. Se puede elegir el modo de funcionamiento, desde medir armónicos hasta valores de rendimiento, potencia, tensión, factores de potencia...

La forma de uso es muy sencilla, el interfaz es bastante intuitivo, desde la consola con iconos de los posibles usos, se pueden seleccionar diversas tareas. Por ejemplo la configuración de las medidas del vatímetro, las tablas de valores que se quieran realizar con posibilidad de medir más de 20 términos a la vez, la realización de gráficas...

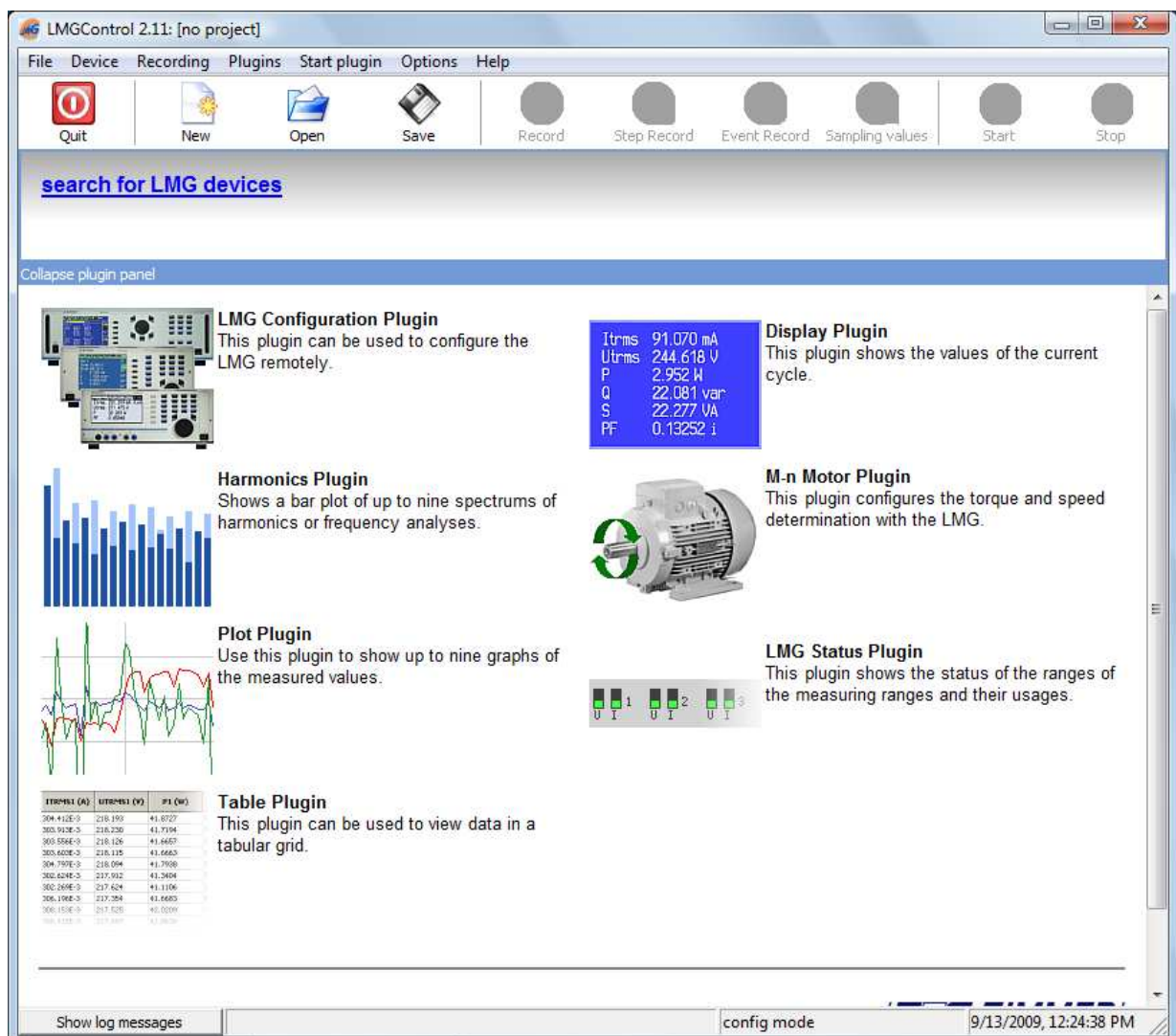


Figura 7.15. Ventana principal del programa LMG control

Una vez obtenidos los resultados requeridos, desde este software se pueden exportar a otros programas. En nuestro caso comenzamos a convertir los valores a archivos .csv para analizar los valores en Excel. Este programa tiene poca capacidad para nuestro cometido y sesgaba la información que exportábamos, ya que con el LMG control podíamos almacenar datos de varios días seguidos.

7.6.2.-ORIGINPRO 7.0

Este software es muy parecido al Excel, la diferencia fundamental es que puede procesar millones de datos. Su utilización es también muy similar, se pueden realizar operaciones en las columnas, exportar e importar datos, realizar análisis detallados de todo tipo, también estadísticos, gráficos de barras, de secciones, logarítmicos, en 2D, en 3D...

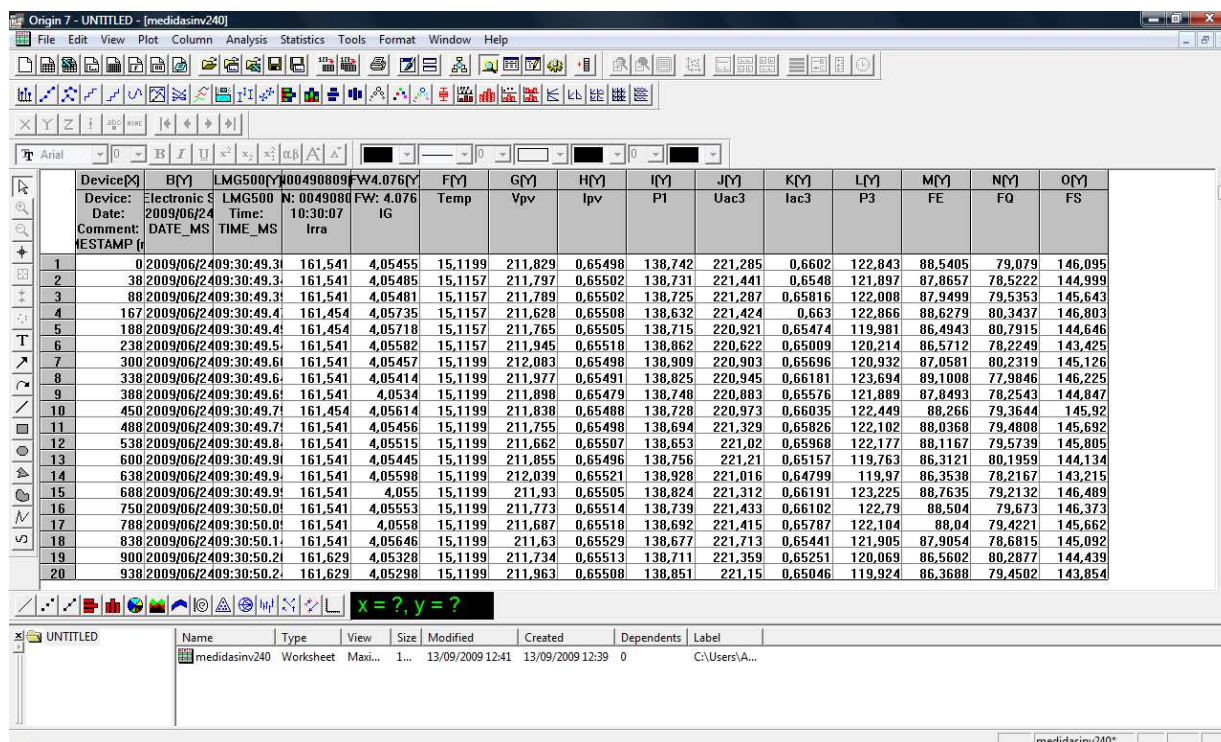


Figura 7.16. Ventana principal del programa OriginPro 7.0

En nuestro caso, las herramientas más utilizadas han sido las gráficas de dos variables en función del tiempo y, una de las novedades que presenta este programa frente al Excel, las gráficas con posibilidad de aumentar una zona determinada para su mejor estudio. A continuación se muestran dos ejemplos de las mismas:

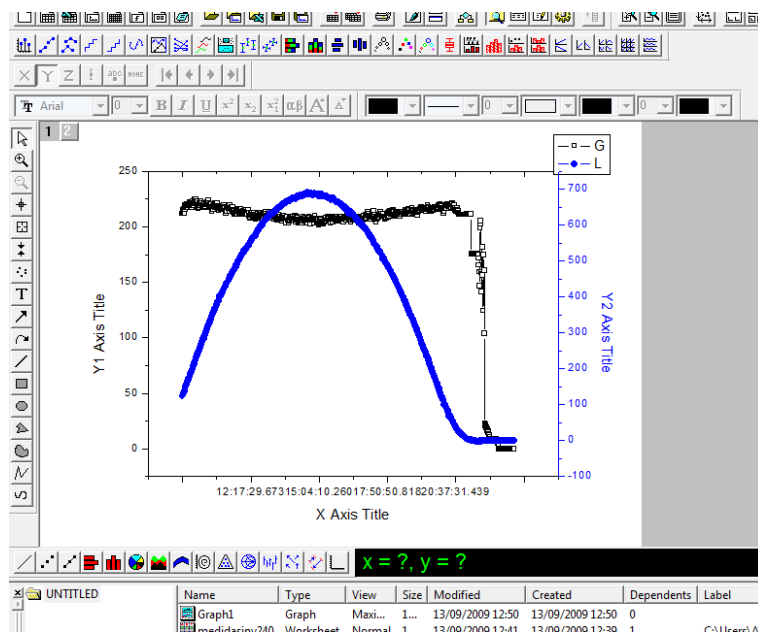


Figura 7.17. Muestra de la función gráfica de dos variables con respecto al tiempo en el programa OriginPro 7.0

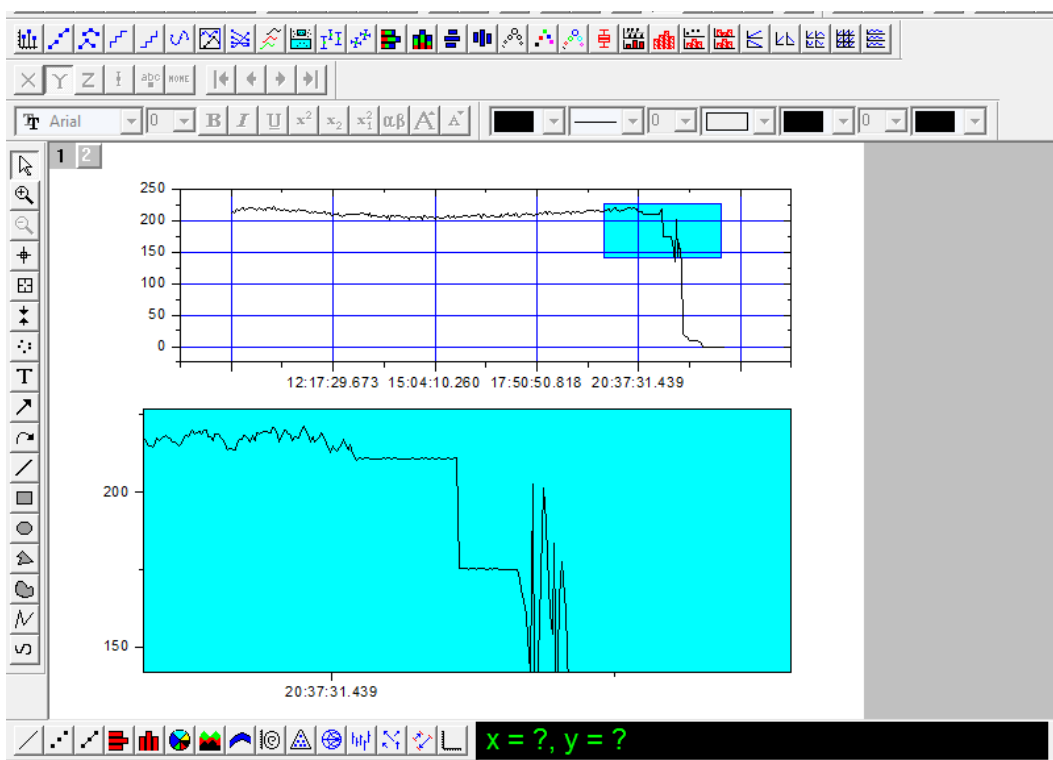


Figura 7.18. Muestra de la función zoom de gráfica en el programa OriginPro 7.0

Capítulo 8:

RESULTADOS

8.-RESULTADOS

Cualquier sistema fotovoltaico conectado a red necesita un convertor de tensión, en nuestro caso ese convertor es un inversor monofásico PWM. En el mercado existen numerosos modelos, así que en este capítulo de resultados hemos analizado los disponibles en el Laboratorio de Electrónica de Potencia. Uno de los parámetros que determinan la elección de un inversor frente a otro es el rendimiento eléctrico de conversión AC/DC, por tanto es uno de los puntos en los que se va a hacer mayor hincapié.

Con motivo de obtener unas conclusiones más amplias, se van a utilizar los resultados de un informe del CIEMAT, consistente en la obtención, a partir de ensayos sobre diversos inversores, de los valores del rendimiento europeo.

En este estudio no se incluye el seguimiento de máxima potencia ni los posibles armónicos del sistema fotovoltaico.

8.1.-INFORMACIÓN GENERAL

El periodo del año en el que se ha realizado el ensayo es el verano, en esta época la irradiación solar es la máxima posible, algo que favorece a la potencia entregada a la red; pero se ha de tener en cuenta que la temperatura es también la máxima, un factor que hace disminuir esta misma potencia. Por tanto, las condiciones en las que se ha medido son óptimas para el estudio completo del rendimiento de cualquier inversor.

La tensión de salida del inversor es muy peligrosa, se han colocado los interruptores correspondientes tanto a la entrada como a la salida de estos. Por supuesto, las medidas realizadas han tenido lugar en períodos alternos, primero con el inversor Steca Grid 300 y después con el inversor Sunny Boy 1100.

Los periodos de toma de datos han sido, aproximadamente, desde las 07.00h de la mañana hasta las 23.00h de la noche, aunque ha habido días que se ha dejado hasta la mañana siguiente para observar el comportamiento del inversor durante la noche.

Por último, cabe destacar que los inversores escogidos son, atendiendo a su protección galvánica, de dos clases. El Steca Grid 300 carece de ella, mientras que el Sunny Boy 1100 posee un transformador de baja frecuencia. Todos los datos concernientes a los inversores están incluidos en el capítulo 7. Es importante saber que según sea este tipo de protección los valores de rendimiento variaran en torno al 2%.

8.2.-STECA GRID 300

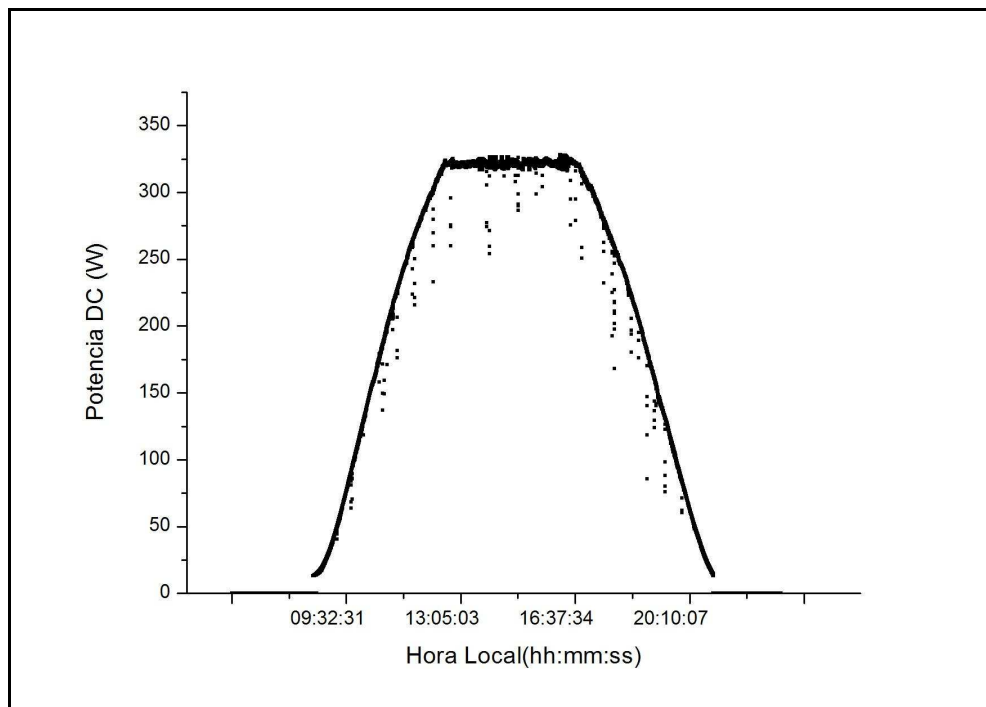
En primer lugar se van a mostrar las gráficas que definen al inversor Steca Grid 300, se ha de tener en cuenta que la potencia nominal de este inversor es de 300W. Se han conectado a este dispositivo dos de los cuatro paneles solares, lo que hace un total de 380W de potencia de entrada (la potencia nominal de cada placa solar es de 190W). Este tipo de operación se llama operación en sobrepotencia. Lo que se buscaba con este proceso es ver el comportamiento del inversor en esta condición especial.

8.2.1.-OPERACIÓN EN SOBREPOTENCIA

La relación óptima entre potencia del generador y potencia del inversor ha sido ampliamente analizada, recomendándose una mayor potencia nominal de generador fotovoltaico respecto de la potencia nominal del inversor. Ello es debido a que la potencia nominal de los generadores fotovoltaicos se refiere a condiciones estándar de medida de 1000 W/m^2 de irradiancia incidente normal, 25° de temperatura de célula. Estas condiciones nominales raras veces se alcanzan en operación real. Por ejemplo, la temperatura de operación de un módulo FV cuando incide una irradiancia de 800 W/m^2 es del orden de 23°C sobre la temperatura ambiente (este valor se ve afectado además por la velocidad del viento y condiciones de instalación del módulo). Las pérdidas de potencia con el aumento de la temperatura del módulo pueden estimarse de modo general como un 4% por cada 10°C de incremento de la temperatura. Todo ello hace que los inversores fotovoltaicos de conexión a red deban estar protegidos para operar si la potencia del generador FV supera la potencia

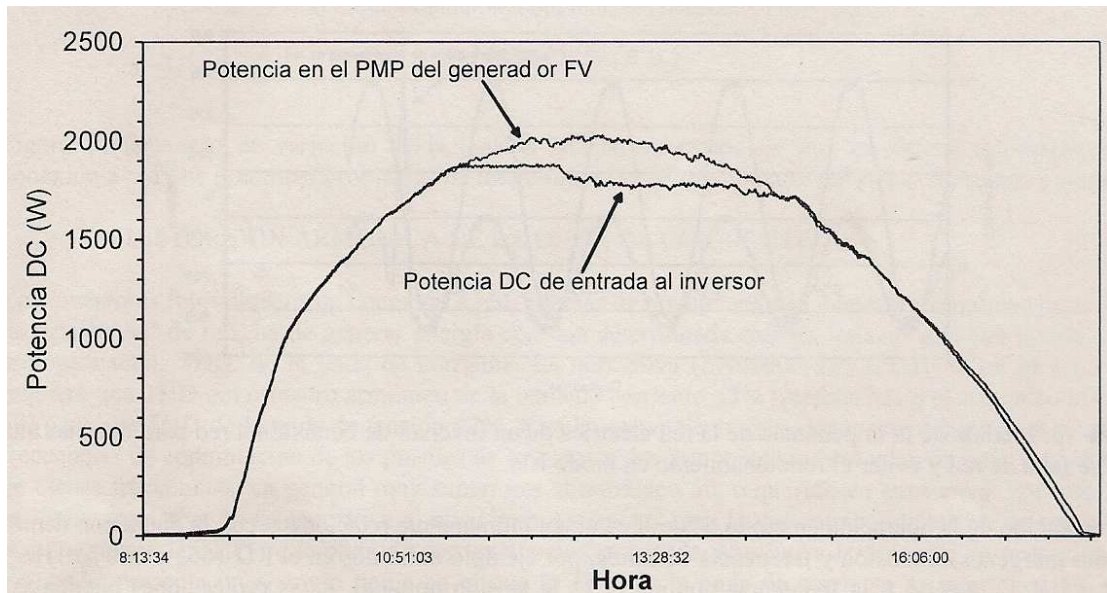
nominal del inversor. Algunos inversores mantienen a un valor predefinido el valor máximo de la potencia DC de entrada, saliéndose para ello de la operación del punto de máxima potencia. Este control puede ser efectuado mediante varios procedimientos: vigilancia de que la temperatura del puente inversor, la corriente o la potencia de trabajo, no superen determinados valores.

En la gráfica siguiente se muestra la potencia DC de entrada al inversor Steca Grid 300, donde se ve claramente el comportamiento de dicho inversor en la operación de sobre potencia. Al no tener medidas a la salida del generador FV, se incluye una gráfica (gráfica 2) cuya fuente es el CIEMAT⁽⁵⁾, donde se observa la comparación entre la potencia del inversor y del generador.



Gráfica 8. 1. Potencia a la entrada del inversor Steca Grid 300 en operación de sobrepotencia

En la Gráfica 8. 1 observamos como a partir de sobrepasar el valor de potencia máxima de entrada indicada por el fabricante, 320 W (hoja de características en el capítulo de anexos), la potencia que se inyecta a la red pasa a ser constante y de ese mismo valor. Evidentemente, el inversor está protegido frente a sobrepotencias.



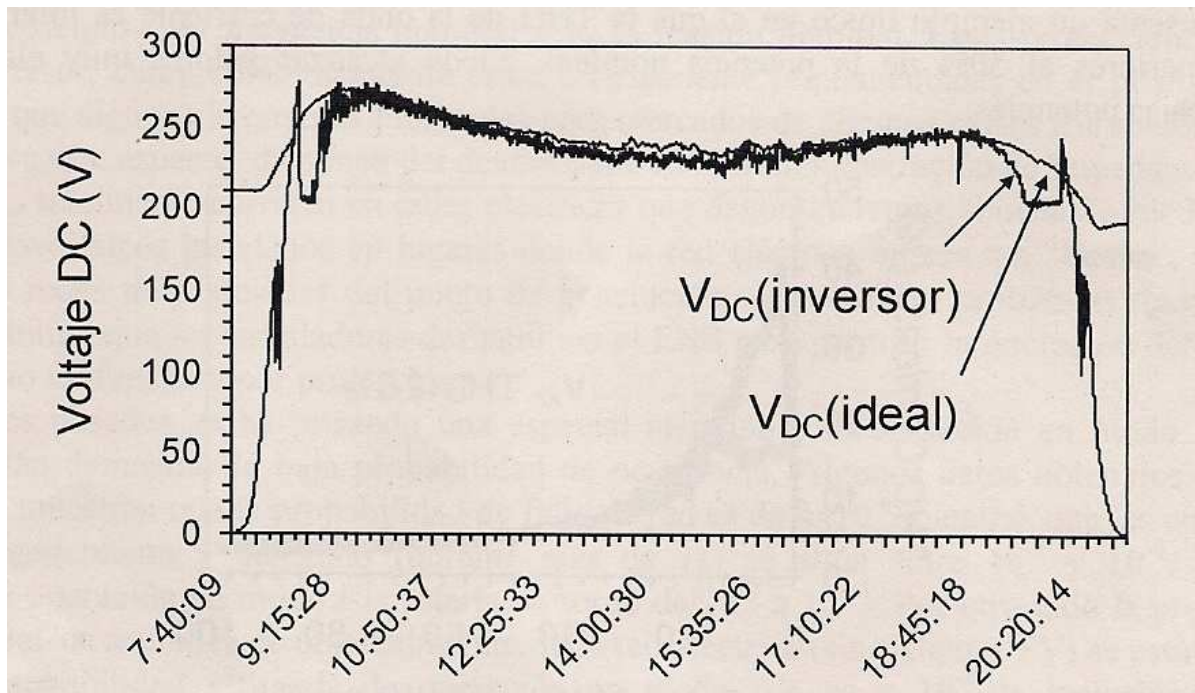
Gráfica 8.2. Potencia del generador FV e inversor en sobrepotencia. Fuente CIEMAT⁽⁵⁾

En la Gráfica 8.2 (fuente: CIEMAT), observamos como el valor de la potencia del generador fotovoltaico, cuando alcanza los valores máximos de potencia, dista de la registrada por el inversor fotovoltaico en un 10%. Evidentemente, no se debe abusar de la operación en sobrepotencia, ya que, para que el rendimiento sea el máximo posible el inversor debe estar trabajando en torno al punto de máxima potencia.

8.2.2.-CARACTERIZACIÓN

Para que un inversor funcione al máximo de sus posibilidades y cumpla los niveles de eficacia ha de trabajar en torno al punto de máxima potencia. La mayoría de los inversores cuentan con un microprocesador que realiza un algoritmo de seguimiento de máxima potencia. La función final de dicho algoritmo es modificar los valores de tensión y corriente para que el inversor trabaje siempre en el punto de máxima potencia.

En ocasiones, durante determinados momentos del día como el amanecer o el atardecer, cuando el inversor trabaja a bajos niveles de potencia, el algoritmo presenta dificultades en la determinación del valor óptimo de la tensión DC de operación. Es en estos periodos cuando se podrían mejorar las condiciones del inversor.

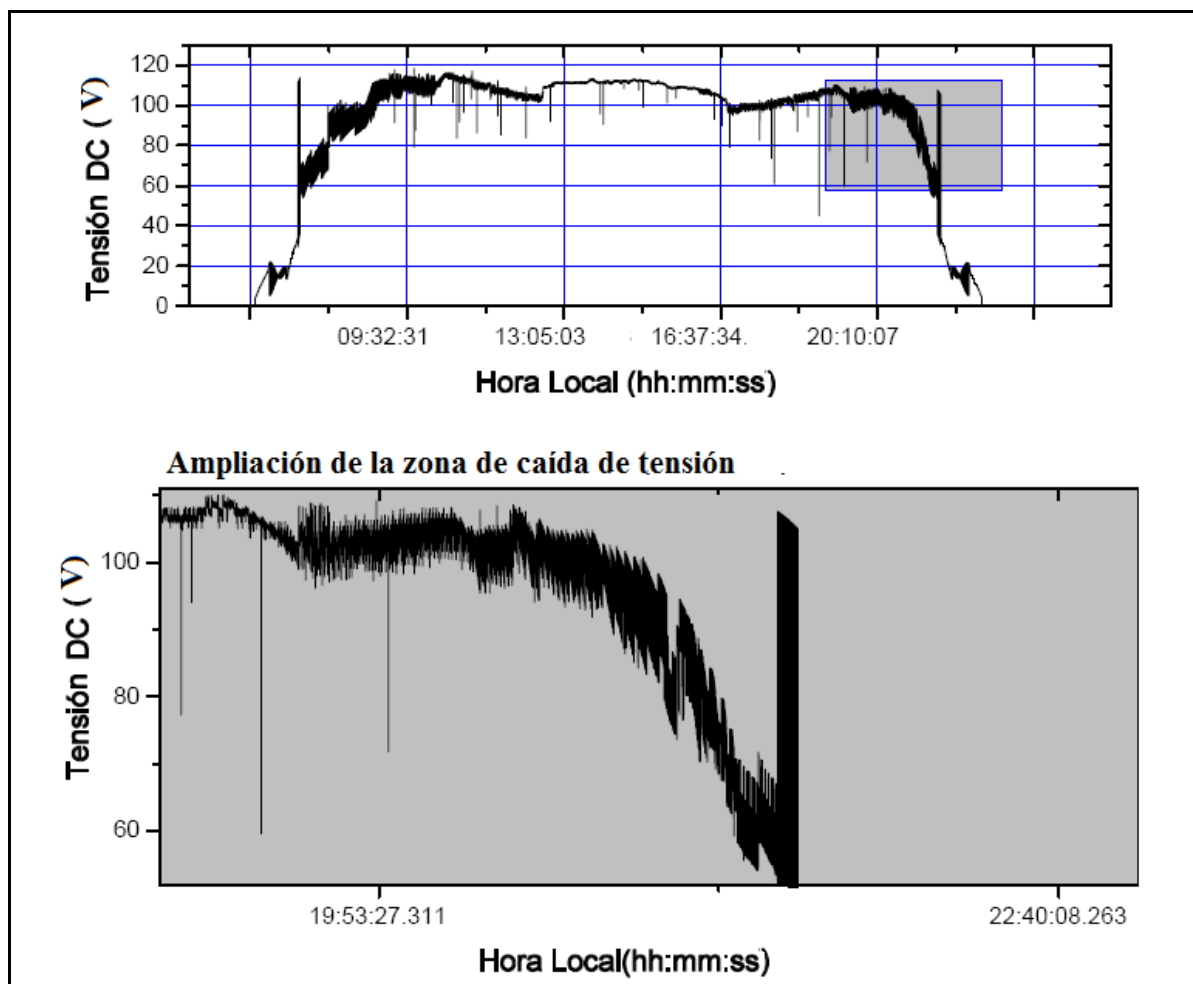


Gráfica 8.3. Ejemplo de variación de tensión DC de operación de un inversor fotovoltaico de conexión a red en el transcurso de un día. Se presenta también el valor óptimo de tensión DC correspondiente con la tensión del punto de máxima potencia en el generador FV. Fuente CIEMAT⁽⁵⁾.

La forma de mejorar este comportamiento sería mediante una limitación de la amplia ventana de tensión SPMP, programada por defecto en el software interno del inversor, acotando los valores de tensión DC de operación a unos valores que se adecuen mejor al

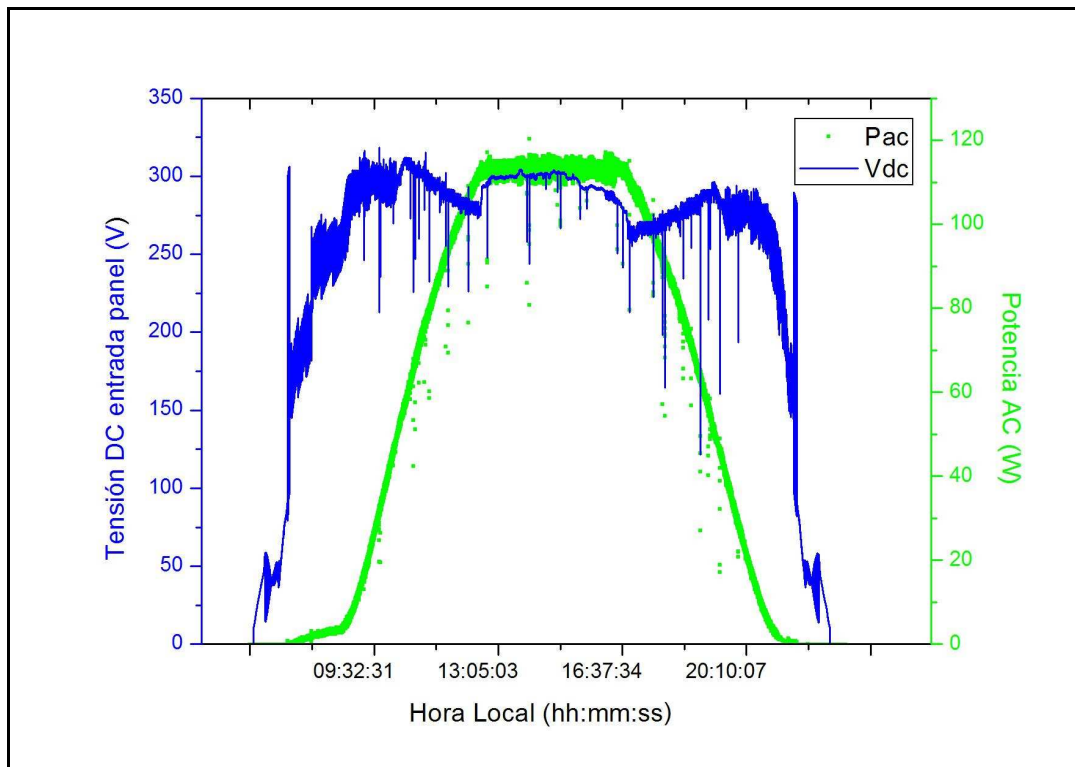
posible rango de variación en función del generador FV utilizado. Esta conclusión la dieron a conocer Miguel Alonso Abella y F. Chenlo, del CIEMAT, en un ensayo sobre inversores fotovoltaicos conectados a red.

A continuación, se muestra la variación de la tensión DC del inversor Steca Grid 300. Al igual que en el caso de la gráfica anterior, se observan picos de tensión en las horas de menos irradiancia, donde es más complicado llevar al inversor al punto de trabajo óptimo.



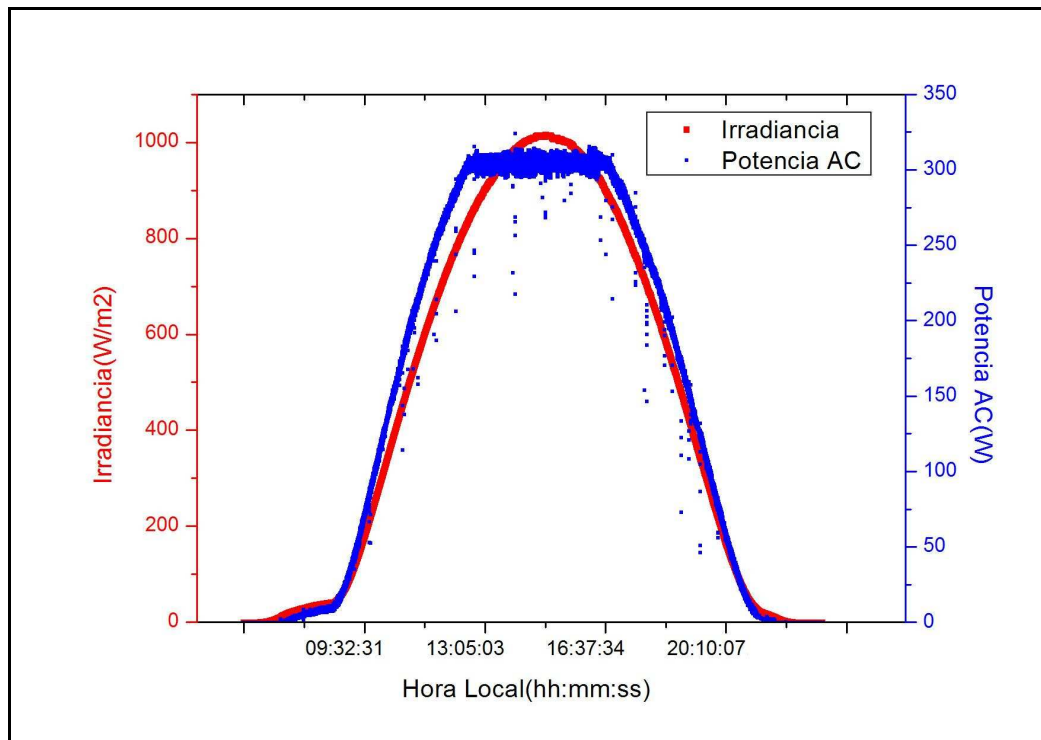
Gráfica 8.4. Tensión de entrada (V) del inversor frente al tiempo

En la gráfica siguiente podemos observar la relación de la potencia de salida y la tensión DC de entrada. Observamos que, según disminuye la potencia, los valores de tensión DC son más inestables. Los valores atípicos se vuelven también más numerosos.



Gráfica 8.5. Relación entre potencia AC y tensión DC en inversor Steca Grid 300

En este estudio también se ha seguido con especial interés la relación existente entre potencia e irradiancia. Como resultado, se ha observado que ambas son directamente proporcionales, lo que confirma los datos estudiados en otros ensayos. Se ha comprobado, pues, que la potencia depende de la irradiancia. Los valores obtenidos se muestran en la figura siguiente, el estudio se ha realizado a lo largo de un día completo, la forma de la curva de potencia se encuentra explicada en el apartado 8.2.1 de este mismo capítulo.



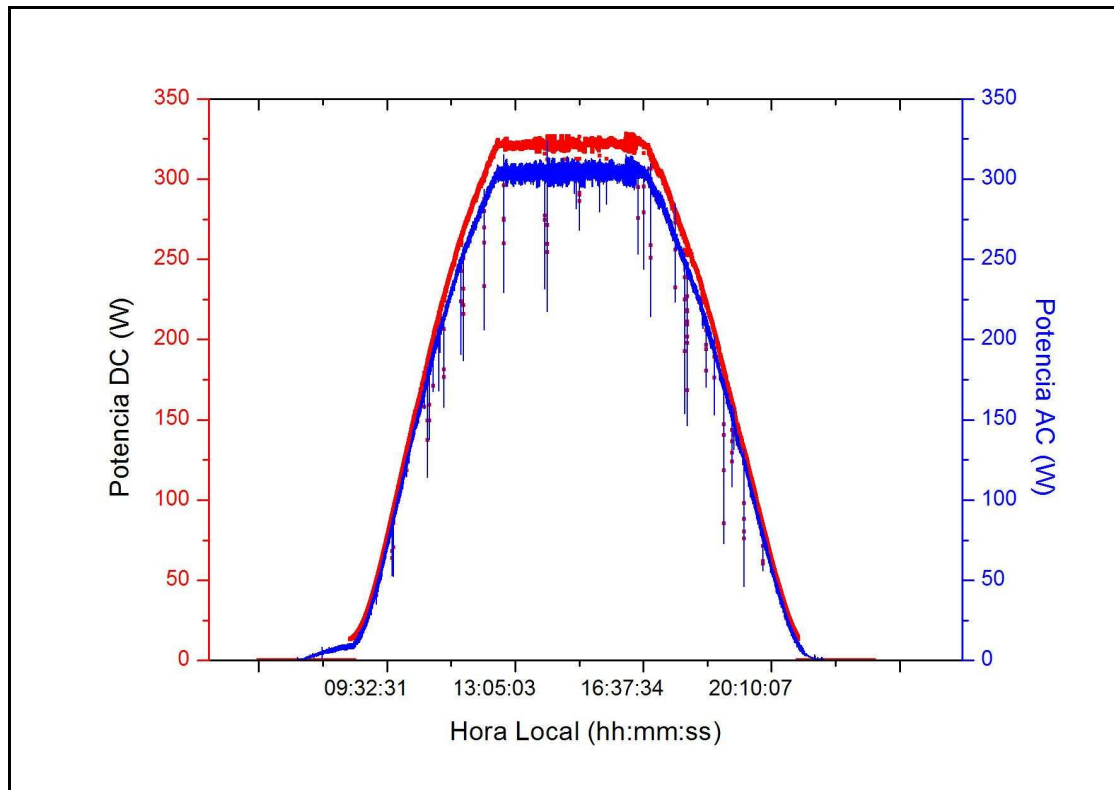
Gráfica 8.6. Curvas de potencia AC e irradiancia a lo largo de un día entero.

8.2.3.-ESTUDIO DEL RENDIMIENTO.

El rendimiento energético, como ya se ha hablado en capítulos anteriores, es la relación entre la potencia de entrada al inversor (DC) y la potencia de salida de este (AC). Se ha comentado en numerosas ocasiones la influencia que ejercen las protecciones (aislamiento galvánico) sobre el rendimiento. En el caso del inversor Steca Grid 300, cabe destacar que el inversor Steca Grid 300 no posee aislamiento galvánico. Aunque los valores de rendimiento son mayores que en los inversores con protección, este tipo de inversor incumple las normativas que actualmente se están imponiendo. Estas normativas están dentro del campo de la seguridad de la red eléctrica, ya que las protecciones de aislamiento lo que consiguen es bajar el número de amperios de corriente DC que se inyecta a la red.

Según el ensayo del CIEMAT, se esperaban unos valores de rendimiento alrededor del 95%. La figura que se muestra es la correspondiente al día 21 de Junio de 2009,

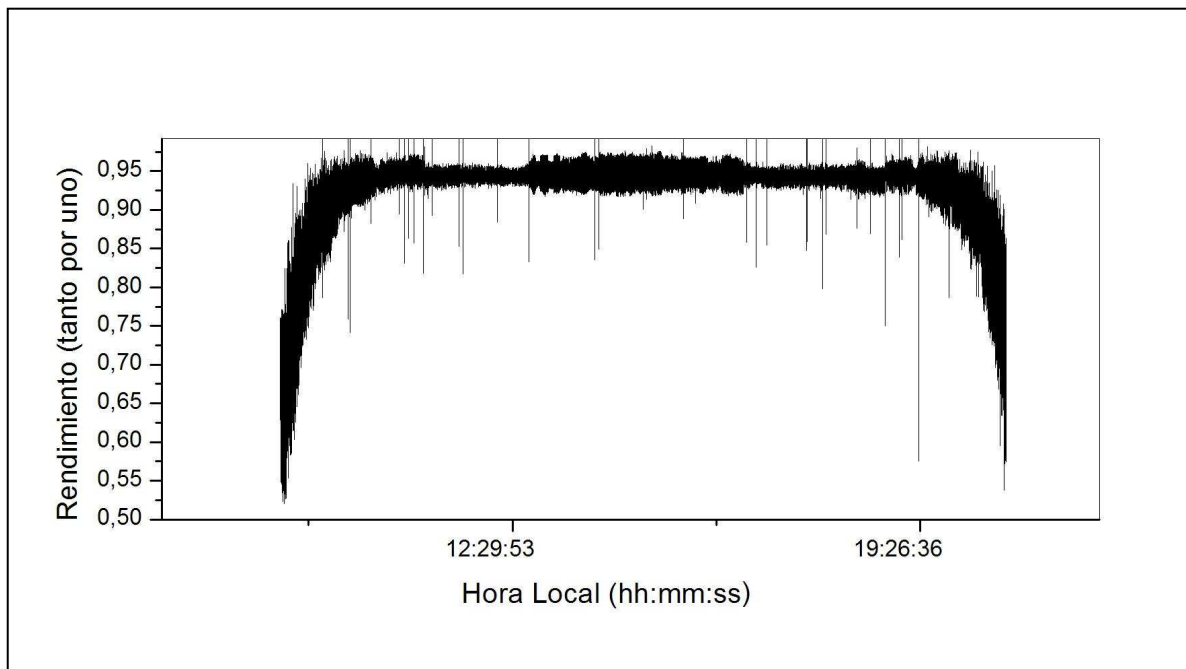
destacando como día soleado y no especialmente caluroso (la temperatura es en torno a los 27.36 °C).



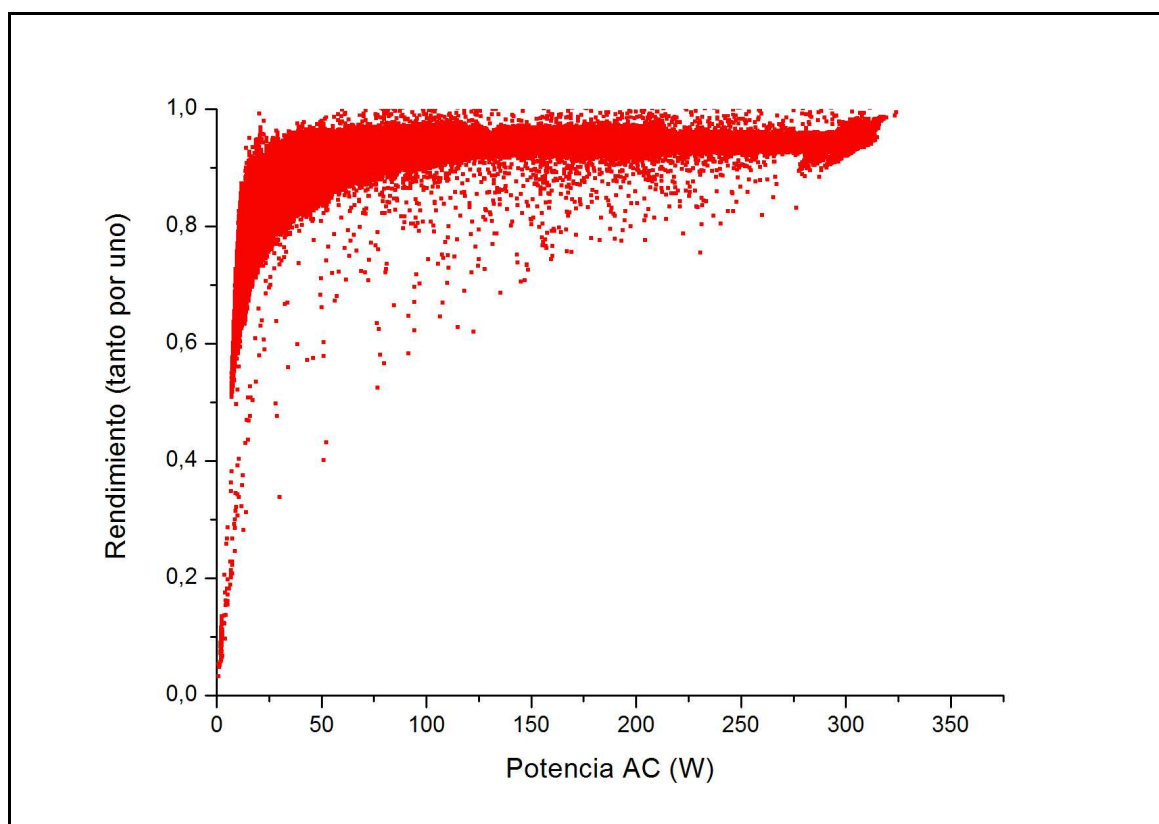
Gráfica 8.7. Potencia DC de entrada y Potencia AC de salida del inversor

Como conclusión podemos observar que la conversión que realiza el inversor es bastante aceptable, y que el valor del rendimiento de este va a estar cercano al 95%. Para un valor de potencia DC máximo medido a las 11:14:12h de 236,845W (un poco por encima de la potencia máxima) se alcanza un valor de 223,602W a la salida del inversor, esto hace que el rendimiento, en tanto por ciento, sea de 94,40%.

Por último, se muestra una gráfica con el rendimiento del inversor Steca Grid 300 a lo largo de un día entero. El rendimiento de conversión DC/AC máximo alcanzado ha sido de 96,114 %, dato medido a las 13:41:45 h del 21 de Junio de 2009, para una potencia DC de entrada al inversor de 317.223 W y una potencia de salida AC de 304.900 W.



Gráfica 8. 8. Rendimiento DC/AC del inversor Steca Grid 300



Gráfica 8. 9. Rendimiento en función de la potencia AC (W)

En la Gráfica 8. 9 se muestra el rendimiento en función de la potencia de salida AC del inversor, es otra de las principales gráficas comparativas que se usan, ya que valores como el del rendimiento europeo (sus parámetros dependen de ciertos valores de potencia a distintitos niveles) tienen un uso muy extendido a la hora de comparar inversores. El resultado del cálculo de los rendimientos europeos, máximo y californiano se encuentra reflejado en el apartado 8.5 de este mismo capítulo.

En cuanto a esta curva, destacamos que el rango de valores de potencia AC de salida del inversor y que es inyectada a la red, durante la cuál el rendimiento se estabiliza, es de 125 W-350 W.

8.3.-SUNNY BOY 1100.

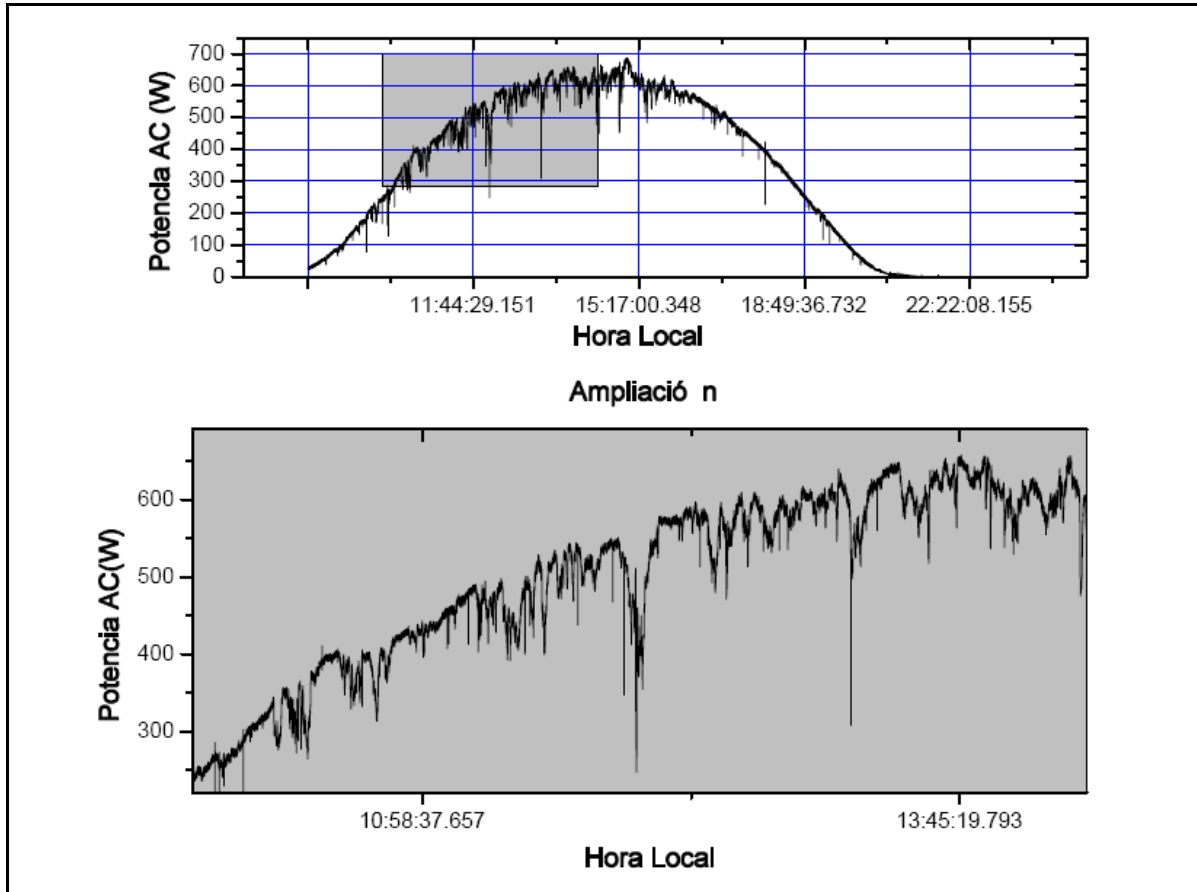
El inversor Sunny Boy 1100 (en adelante, SB1100) tiene de potencia nominal 1000 W, su potencia máxima es de 1100W. En este caso, la forma de operación no va a ser de sobrepotencia, como era el caso del anterior inversor. El número de paneles solares conectados al SB1100 es de cuatro, lo que hace un total de 760 W de potencia DC de entrada.

8.3.1.-CARACTERIZACIÓN

En primer lugar se va a estudiar la potencia de salida AC, es decir, la potencia ya convertida. Como en el caso del inversor Steca Grid 300, el SB1100 contiene un software interno que mantiene al inversor trabajando en torno al punto de máxima potencia.

Los datos obtenidos han sido tomados cada 100 ns, es por ello por lo que en determinadas gráficas se observan valores que se salen de la tendencia de las curvas. Estos picos son debidos, fundamentalmente a la presencia de nubes intermitentes, o hasta incluso, la presencia de algún ave que provoca alguna sombra.

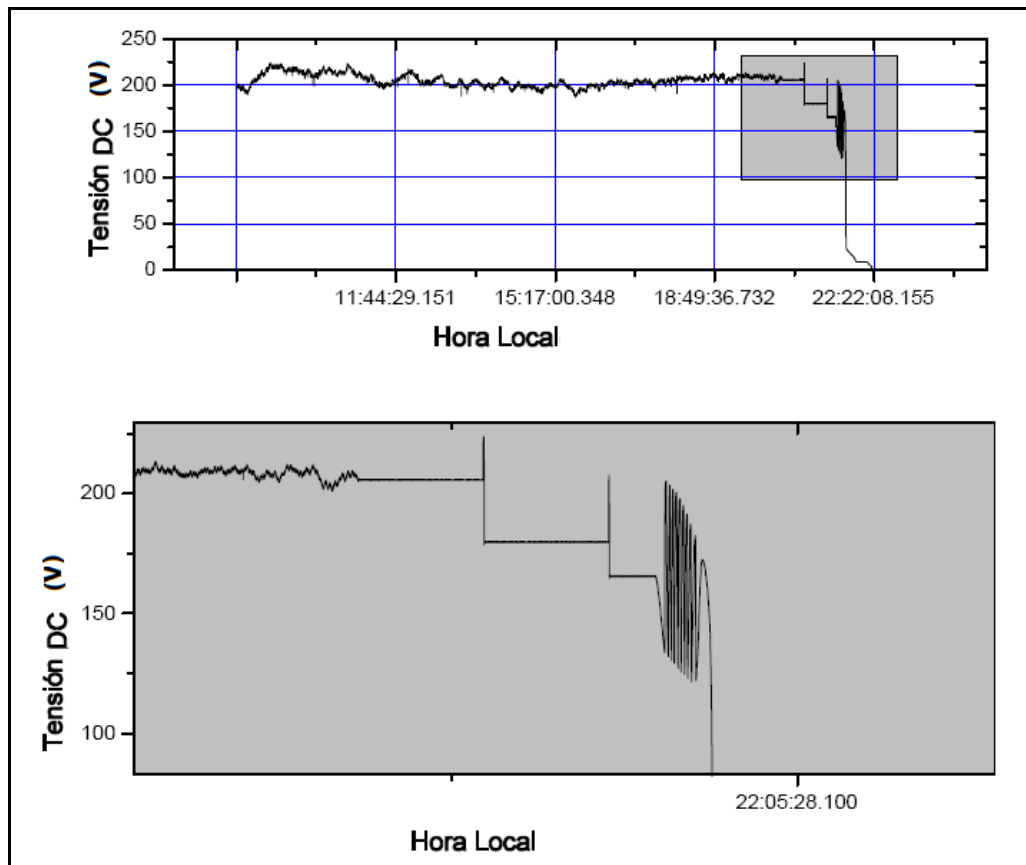
En la Gráfica 8.10 observamos como los valores de potencia no son truncados, al contrario que en el ensayo anterior, ya que la potencia nominal de las placas es inferior a la potencia nominal del inversor (760W de las placas frente a 1000W del inversor). En esa misma figura podemos ver también, que la curva es más suave, y que la subida de potencia se realiza más lenta que en el caso del Steca Grid. En el apartado correspondiente a comparativa analizaremos esta característica con mayor detenimiento.



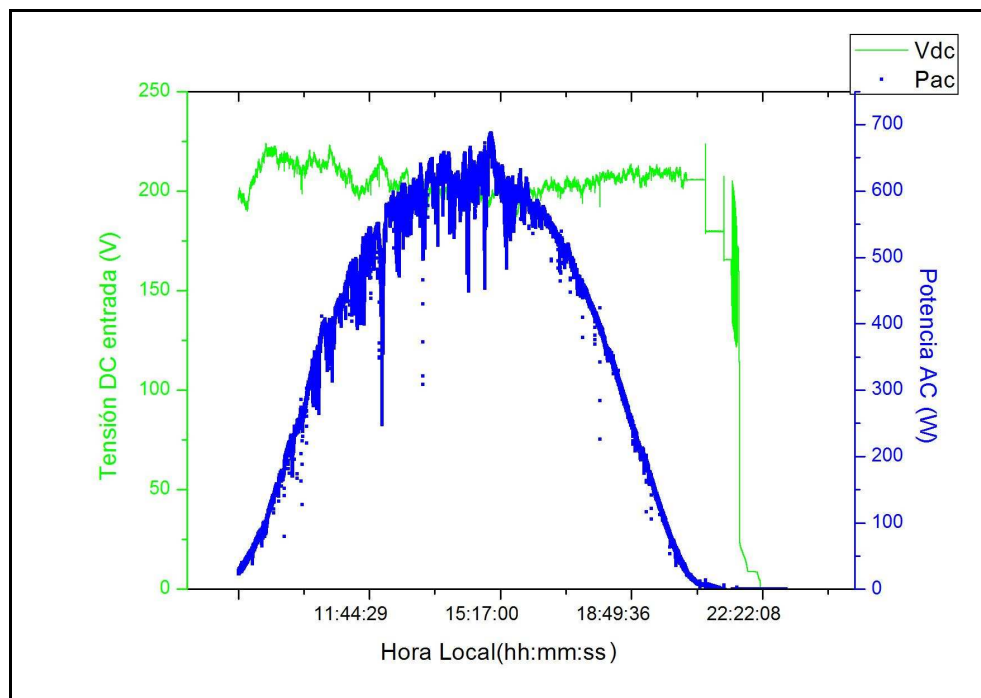
Gráfica 8.10. Potencia AC(W) del inversor SB110

Como ya se ha comentado, un correcto funcionamiento del inversor es cuando este trabaja alrededor del punto de máxima potencia. También es sabido que el rendimiento podría mejorarse cuando el inversor trabaja a bajos niveles de potencia, durante las horas del amanecer y el atardecer, en las que el algoritmo de seguimiento de máxima potencia presenta dificultades en la determinación del valor óptimo de la tensión DC de operación.

Seguidamente, se muestra la gráfica en la que vemos como varía la tensión en función del tiempo. En este caso, las variaciones en los umbrales de peor funcionamiento vuelven a aparecer, pero de una forma menos abrupta.



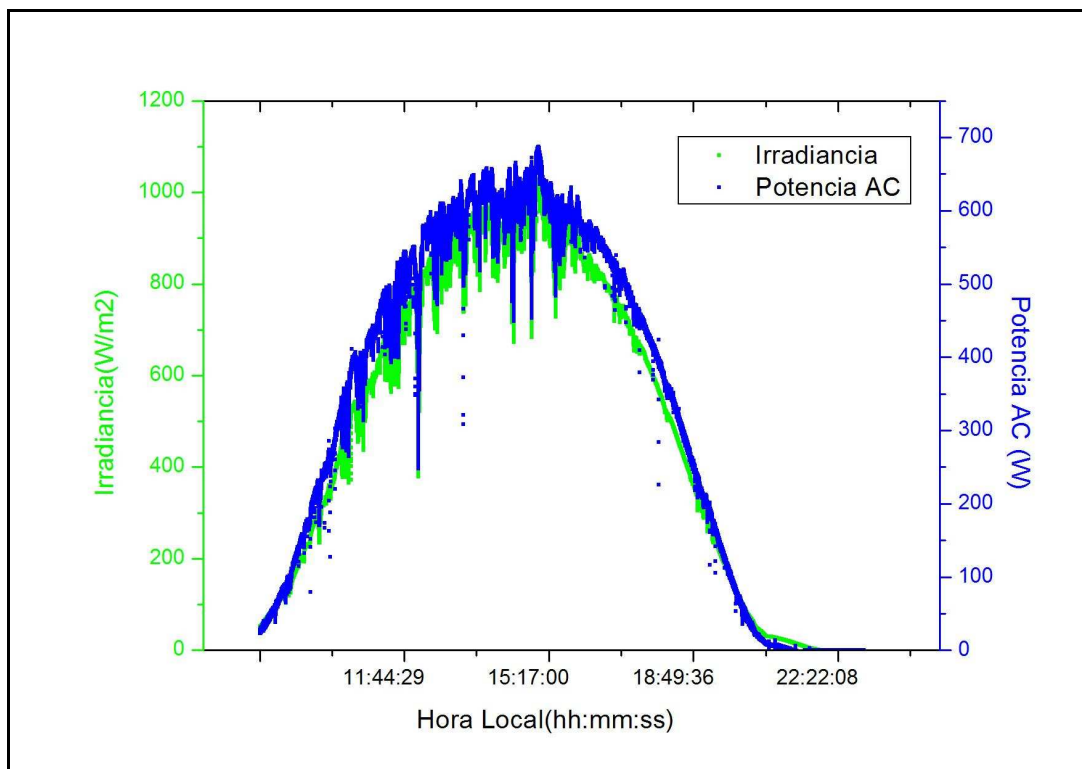
Gráfica 8.11. Tensión DC de entrada al inversor SB1100



Gráfica 8.12. Relación entre potencia AC y tensión DC en el inversor SB1100

En la Gráfica 8.12 podemos observar la relación de la potencia de salida y la tensión DC de entrada. Observamos que, según disminuye la potencia, los valores de tensión DC son más inestables. Los valores atípicos se vuelven también más numerosos.

Como en el caso anterior, adjuntamos el estudio que relaciona la potencia con la irradiancia. En este caso, los valores son todavía más proporcionales, ya que no se opera en sobrepotencia. Las curvas describen el mismo movimiento, el valor de la máxima potencia 669.399 W se alcanza cuando la irradiancia toma el valor de 996.986 W/m^2 , muy cercano a las condiciones ideales de medida (1000 W/m^2 y 25°C), en este caso la temperatura es de $27,95^\circ\text{C}$.



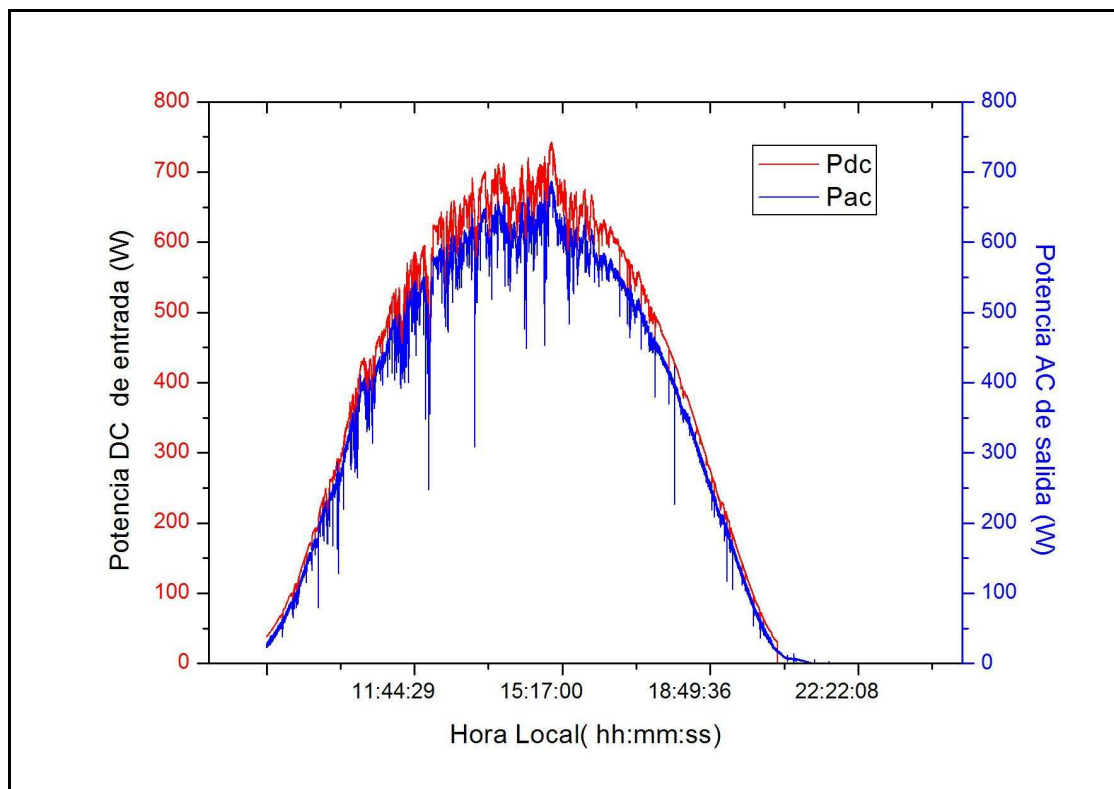
Gráfica 8. 13. Relación entre potencia AC e irradiancia

8.3.2.-ESTUDIO DEL RENDIMIENTO

El rendimiento AC/DC es un parámetro básico para seleccionar unos inversores frente a otros, el tipo de aislamiento galvánico es muy determinante a la hora de alcanzar ciertos valores de rendimiento. La razón concreta del porqué usar este tipo de protección es

básicamente por la cantidad de corriente DC que se inyecta a la red. Actualmente se están implantando normas tipo IEC61727, que indican diferentes valores máximos permisibles de inyección de corriente DC a la red eléctrica (0.5% de la potencia nominal del inversor en USA, 1% en Japón, 1 A DC en Alemania y 5mA en Reino Unido y Australia). En el apartado de comparativas se adjuntarán los valores de corriente inyectados a la red de ambos inversores y se demostrará que el inversor SB1100 con protección galvánica inyecta menos corriente a la red que el Steca Grid 300.

La definición de rendimiento energético viene dada como la potencia AC de salida entre la potencia DC de entrada del inversor. En la Gráfica 8. 14 podemos contemplar esta relación.



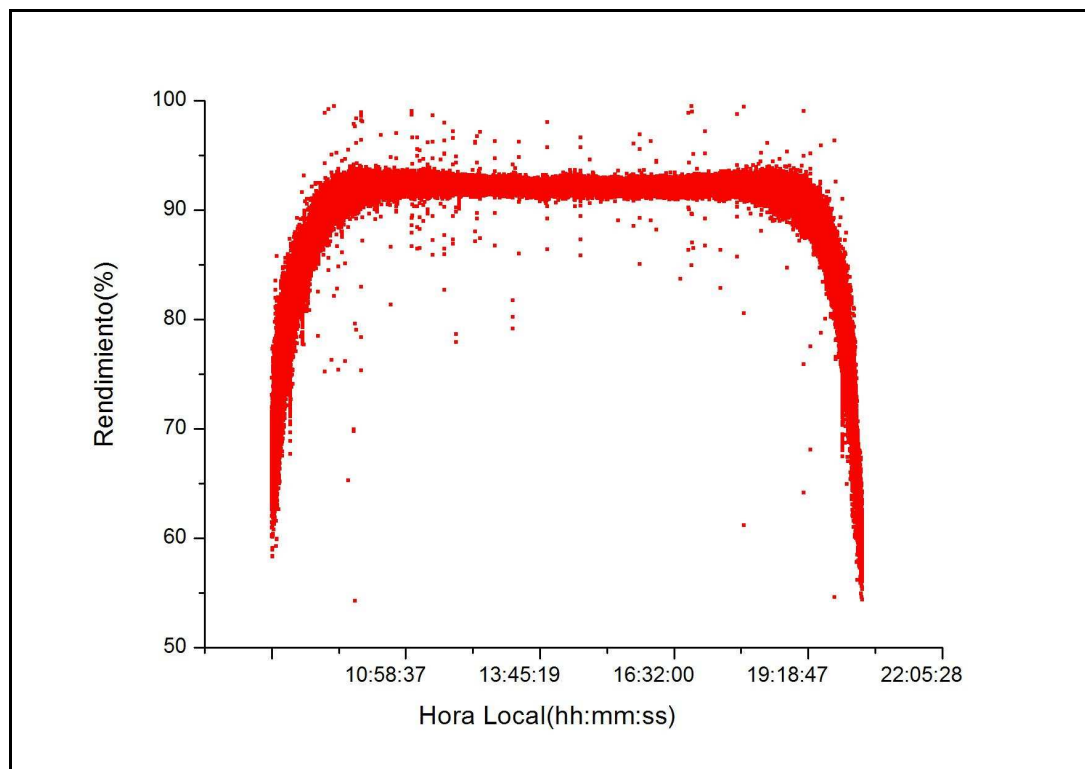
Gráfica 8. 14. Potencia de entrada (DC) y de salida (AC) del inversor SB1100

La conversión que realiza el inversor es bastante aceptable, la relación entre potencias es similar a la del apartado anterior. El rendimiento está cercano al 92%. Para un valor de potencia DC máximo medido a las 15:00:44h de 732.334 W se alcanza un valor de 674,527

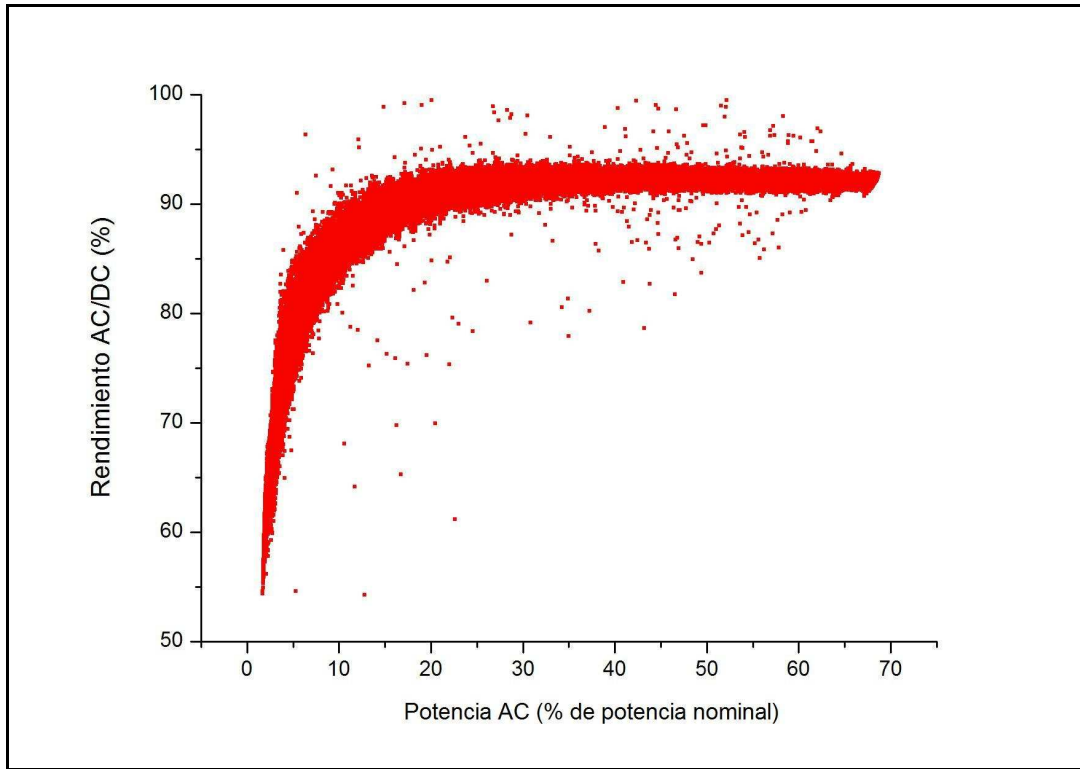
W a la salida del inversor, esto hace que el rendimiento, en tanto por ciento, sea de 92.43%. Este dato concuerda con los datos aportados por el CIEMAT para los inversores con aislamiento galvánico de baja frecuencia (capítulo 6).

En último lugar, se adjuntan las curvas pertenecientes al rendimiento, en función del tiempo y en función de la potencia nominal AC.

Se puede observar que en la Gráfica 8.15 el rendimiento se estabiliza a partir de las 11 de la mañana aproximadamente, alcanzando un valor en torno al 93%. Es hacia las 18:00 h cuando comienza a decrecer. Los datos aquí reflejados fueron tomados desde las 6:00 h de la mañana hasta las 23:00 h, es decir, durante el día entero. El espacio de tiempo durante el cual el inversor funciona eficazmente es mayor en los meses ensayados que en invierno, evidentemente, hay más horas de luz.



Gráfica 8.15. Rendimiento DC/AC (%) del inversor SB1100



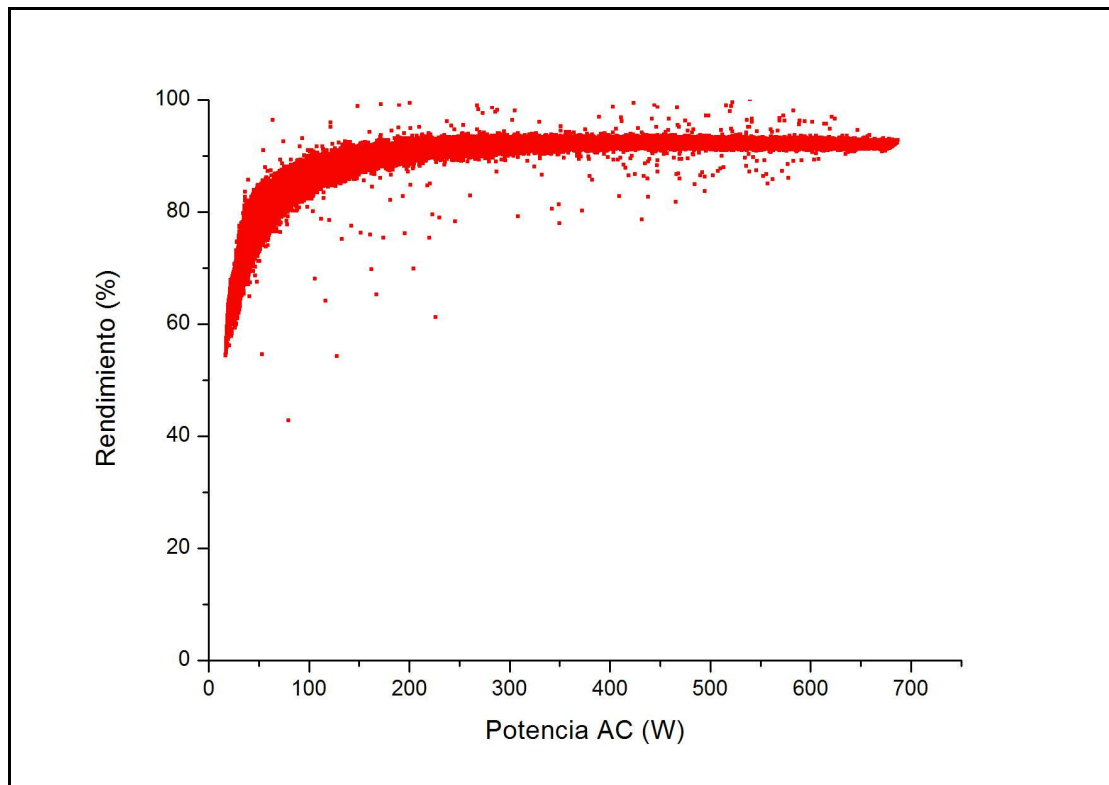
Gráfica 8. 16. Rendimiento de conversión AC/DC frente a la potencia AC normalizada, inversor SB1100

Los valores de rendimiento AC/DC se expresan en función de la potencia normalizada principalmente por el parámetro del rendimiento europeo, este viene expresado en función de ciertos valores a ciertos porcentajes de la potencia nominal. La forma de expresar la potencia AC normalizada en tanto por ciento ha sido la siguiente:

$$P_{AC}(\%) = \frac{P}{P_{nom}} \times 100 \quad \text{Ecuación 8. 1}$$

Donde $P_{nom} = 1000W$

En la Gráfica 8.15, la tendencia que toma la curva es hacia el rendimiento máximo. En el caso de este inversor, este valor es de 92.529%. Cuando la potencia es del 10%, el rendimiento llega al 88.132%. No se alcanzan valores de potencia superior al 80 %.

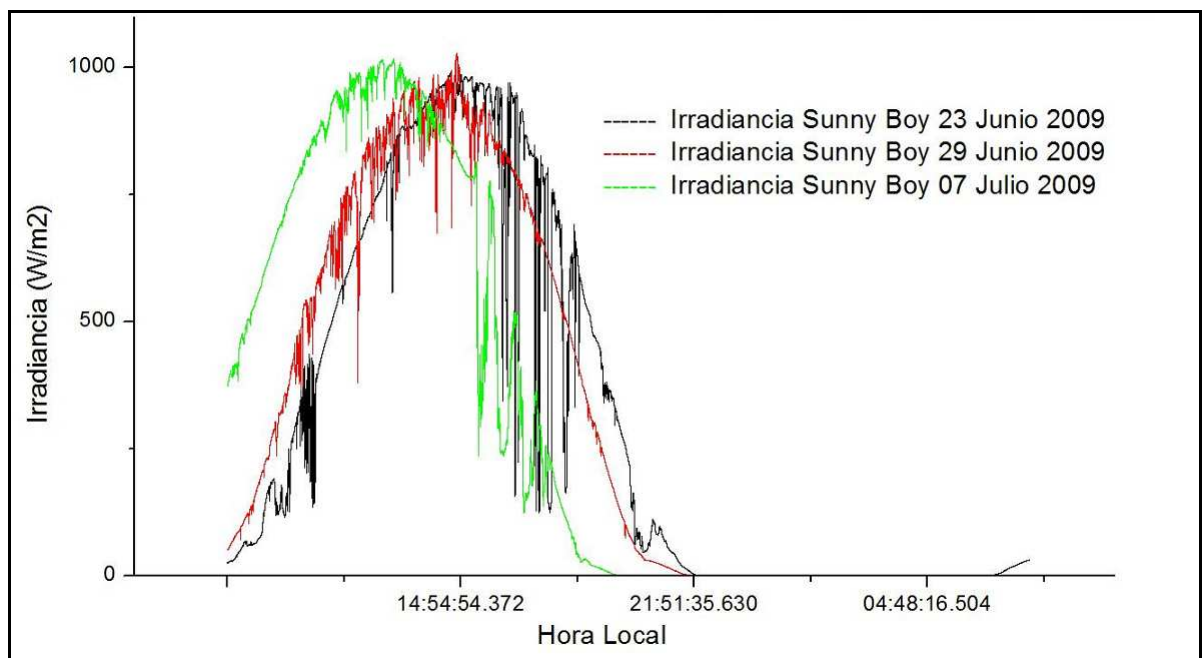


Gráfica 8.17. Rendimiento en función de la potencia AC(W)

En la Gráfica 8.17 se aprecia que entre 250 W y 760 W la eficacia es prácticamente constante, en torno al 91%. El rendimiento al 10%(76 W) de la potencia nominal se mantiene superior al 85% y al 5% (37.5 W) de la potencia nominal superior al 70%.

8.4.-COMPARATIVA ENTRE INVERSORES.

Antes de comenzar con la comparativa entre ambos inversores, conviene destacar que los periodos del mes en el que fueron tomados los datos no son exactamente los mismos, esto implica que los valores de irradiancia varían de un inversor a otro y, por tanto, las curvas pueden estar desplazadas aproximadamente una hora. Como hemos visto en apartados anteriores, la irradiancia y la potencia están relacionados directamente. En la Gráfica 8.18 se han escogido, a modo de ejemplo, las irradiancias captadas por la célula solar cuando el inversor utilizado era el SB1100.

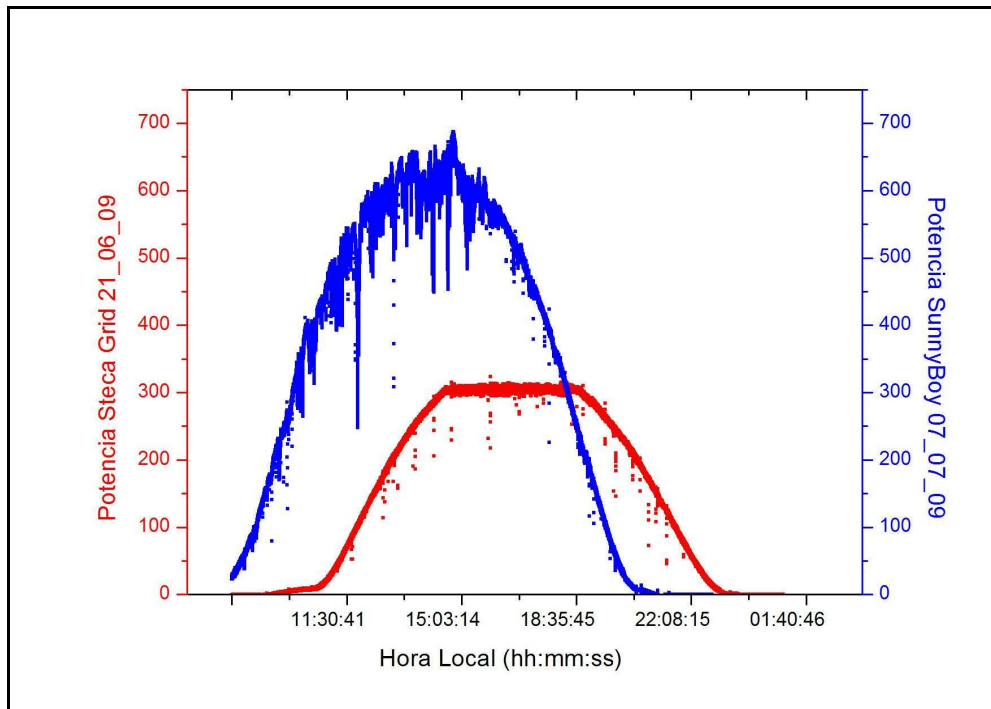


Gráfica 8.18. Muestra de irradiancias en distintos días.

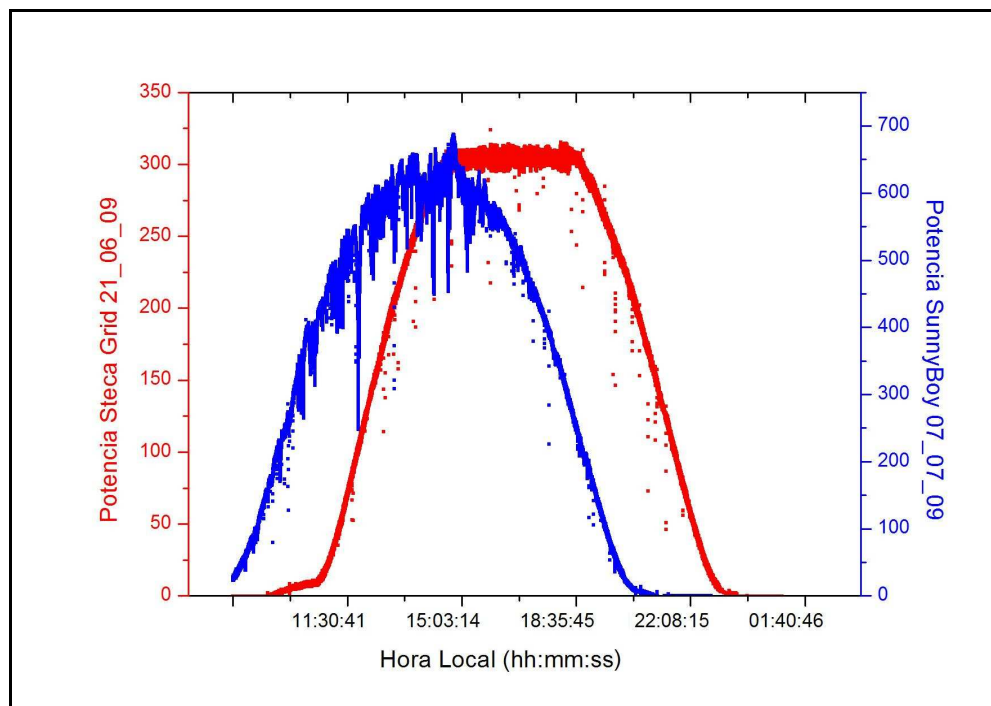
8.4.1.-POTENCIA DE SALIDA AC

La potencia es un factor determinante dentro del estudio de inversores, uno de los ensayos que se realizan es el seguimiento del punto de máxima potencia. En este proyecto no nos vamos a centrar en eso, simplemente vamos a comparar las potencias registradas a lo largo de un día completo en ambos inversores. En la figura siguiente podemos observar varios sucesos interesantes. El primero de ellos es la descentralización de las potencias, ambas están desfasadas aproximadamente una hora, ya se ha explicado en el apartado

anterior que esto es debido a la diferencia entre irradiancias entre el mes de Julio y el mes de Junio.



Gráfica 8.19. Comparativa de potencias de los inversores



Gráfica 8.20. Comparativa de potencias (escalas proporcionales)

Otro de los sucesos ha destacar es la rapidez con que se alcanza en cada inversor el punto de máxima potencia, prácticamente las pendientes son iguales, como se observa en la figura anterior. El SB1100 (curva de color azul) tarda 130 minutos aproximadamente en alcanzar el objetivo mientras que el Steca Grid 300 tarda 100 minutos. La diferencia de media hora es, simplemente que los valores a llegar son uno el doble que el otro.

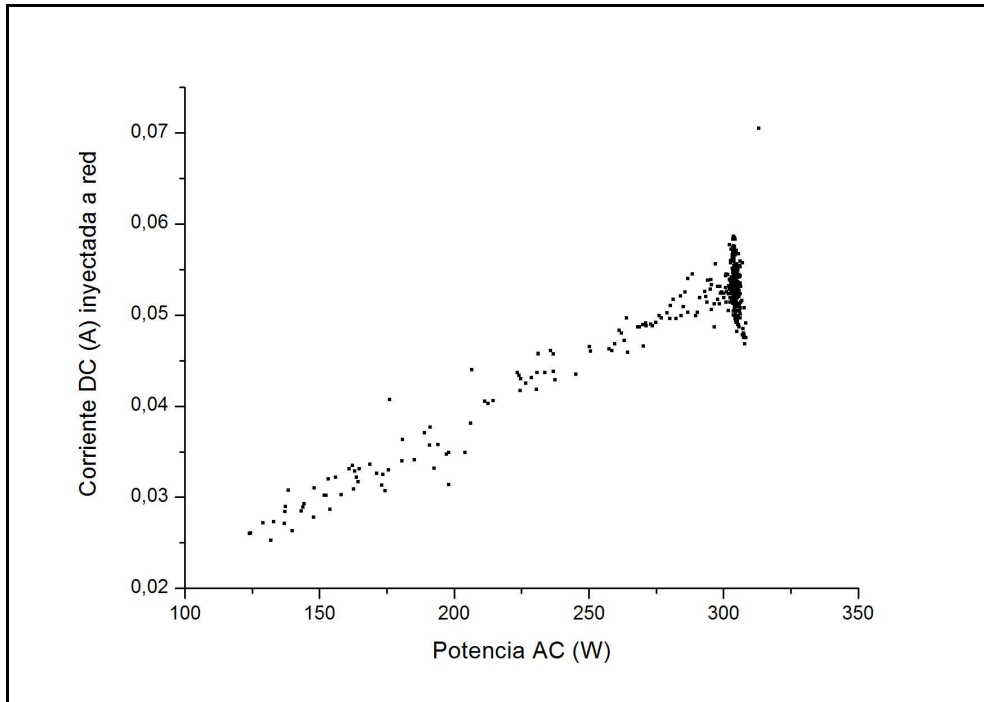
8.4.2.-INYECCIÓN DE CORRIENTE DC A LA RED ELÉCTRICA

La inyección de corriente DC (I_{DC}) a la red eléctrica es un efecto no deseado por varias razones, tales como, saturación de transformadores, elevadas corrientes en los primarios de los transformadores, fundición de fusibles, corrosión, calentamiento de cargas, etc...

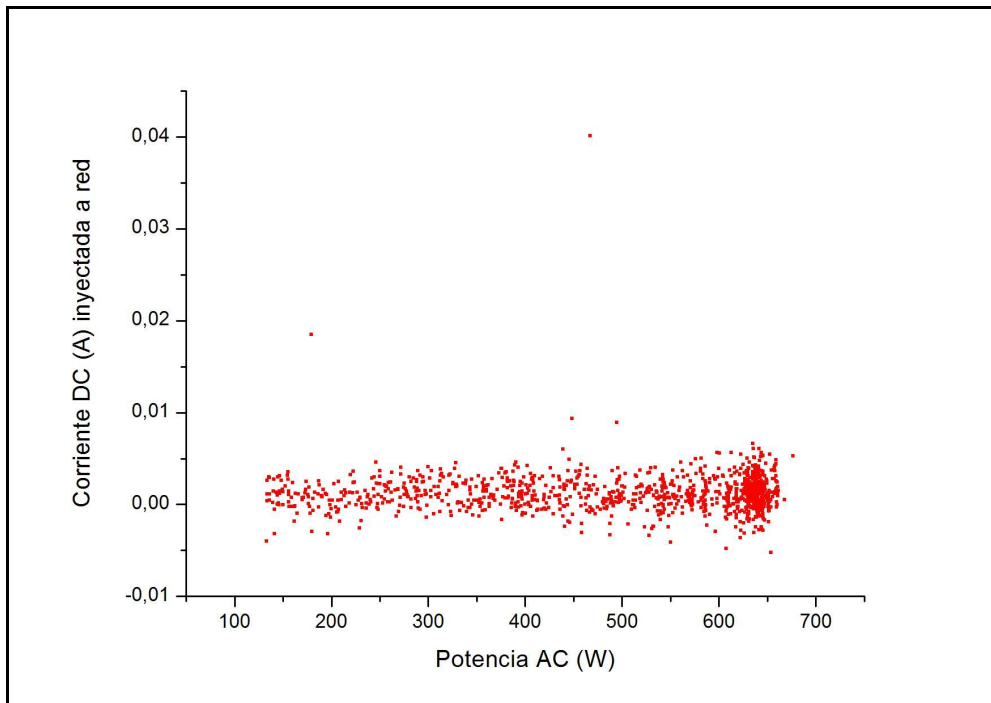
La distinción, desde el punto de vista experimental, entre corriente DC generada por el inversor y la corriente DC que pudiera existir en la red eléctrica a la que se conecta es ciertamente dificultosa. La medida de corrientes DC del orden de mA superpuestas a corrientes RMS del orden de decenas de amperios está limitada tanto por la precisión como por la resolución del instrumento de medida que se utilice. Dado que el transformador del inversor es un cortocircuito para la corriente DC que pudiera provenir del inversor, es coherente suponer que en estos casos la corriente DC medida a la salida del inversor es una corriente DC existente en la propia red eléctrica.

En las gráficas 21 y 22 observamos la diferencia existente entre la corriente DC inyectada por uno y otro inversor. Mientras que en el Sunny Boy 1100 no supera 5mA, el Steca Grid 300 llega a valores de 60 mA. Según que normativas, este último valor estaría muy por encima de lo máximo permitido, por ejemplo en Reino Unido y Australia el valor de corriente DC máxima es de 5mA. Cabe destacar que el valor de I_{DC} inyectado por el SB1100 es constante, es decir, no depende de la potencia AC suministrada, mientras que en el caso del Steca Grid 300, este valor aumenta linealmente con la potencia. Esto quiere decir que potencias altas pueden provocar grandes inyecciones de I_{DC} en la red.

Como posible solución para este tipo de problema lo que se suele hacer es usar un transformador de aislamiento al lado del inversor, eliminando la posibilidad de inyección de este tipo de corriente.



Gráfica 8. 21. Corriente DC inyectada a la red por el inversor Steca Grid 300

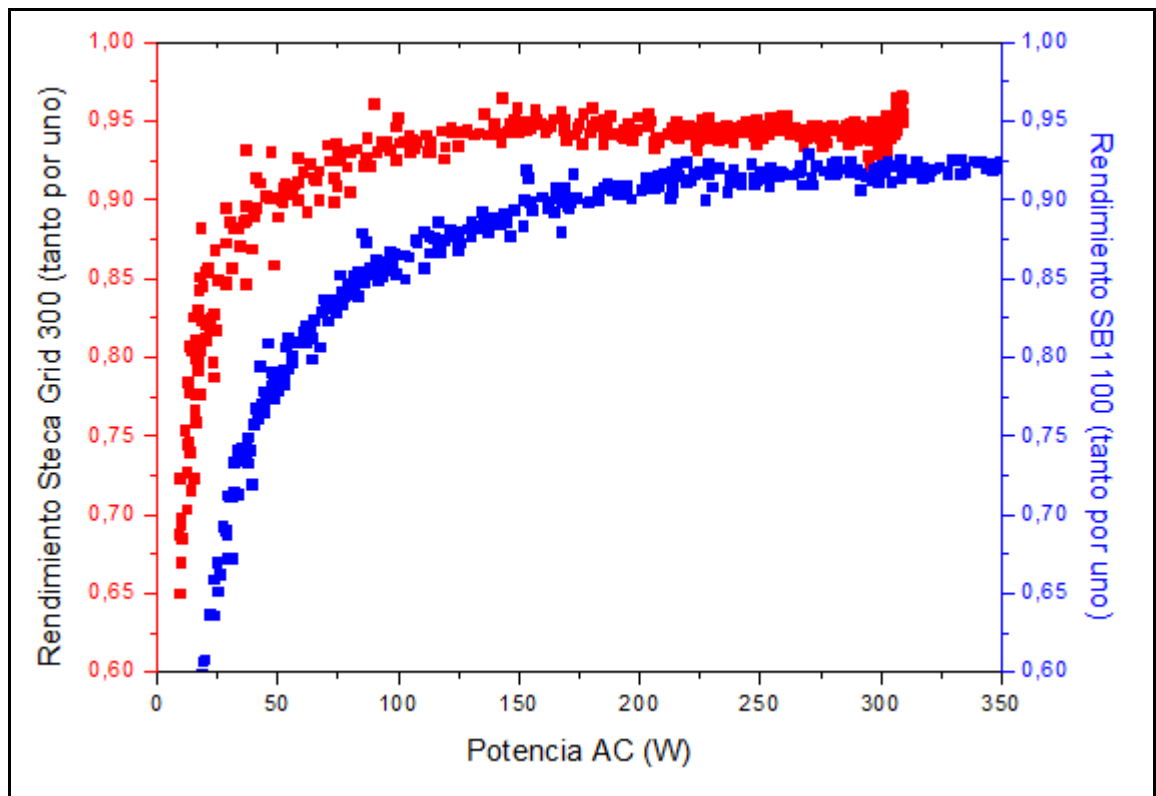


Gráfica 8.22. Corriente DC inyectada a la red por el inversor Sunny Boy 1100

8.4.3.-RENDIMIENTO

Es el parámetro más representativo a la hora de comparar inversores fotovoltaicos. Después de analizar otros factores que pueden influir al rendimiento como la potencia AC, la tensión Vdc, la irradiancia y el tipo de transformador de frecuencia, presentamos los valores de rendimiento de cada inversor respecto a la potencia AC (W) inyectada a la red.

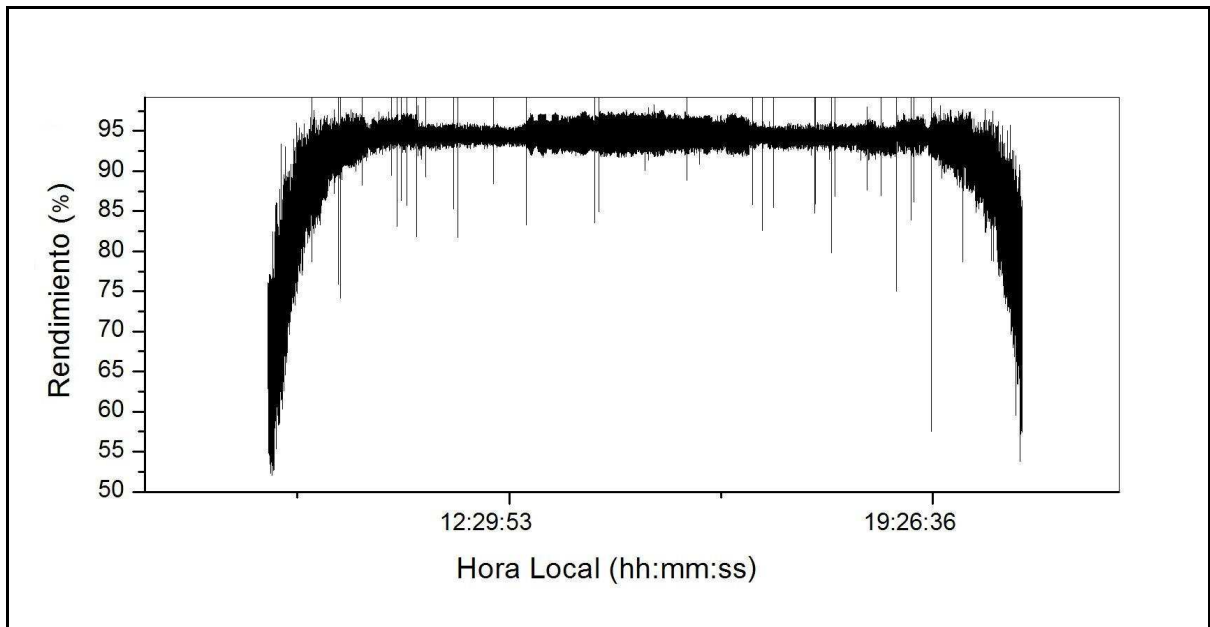
Para que la comparación sea más representativa, se ha escogido un ancho de escala igual al del inversor que tenga menor ancho de escala, en este caso al Steca Grid 300 (350 W). El rendimiento está expresado en tanto por uno.



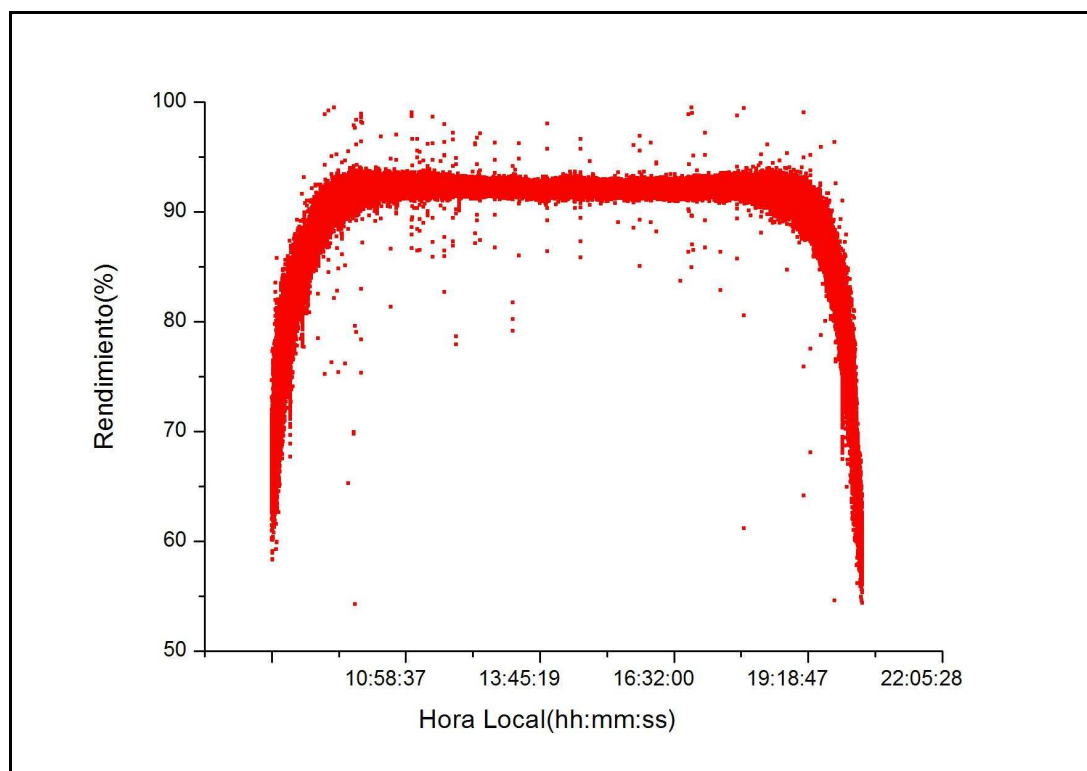
Gráfica 8.23. Comparativa entre rendimientos de inversores.

En primer lugar hablaremos de la rapidez con cada inversor alcanza el máximo rendimiento. Observamos que el Steca Grid 300 (curva de color rojo), alcanza este valor a partir de los 125 W de potencia, mientras que el SB1100 (curva de color azul) no lo consigue hasta los 250W de potencia AC de salida del inversor. Es decir, el inversor SB110 tarda más en alcanzar el valor de rendimiento máximo. A continuación, se muestran las

curvas correspondientes del rendimiento en función del tiempo para cuantificar la rapidez en términos temporales.



Gráfica 8. 24. Rendimiento (%) del inversor Steca Grid 300



Gráfica 8.25. Rendimiento (%) del inversor Sunny Boy 1100

De las tablas de datos obtenidas (Tabla 8.5) , sabemos que la hora a la que el Steca Grid 300 que el tiempo que tarda en alcanzar el rendimiento máximo desde que supera el valor de rendimiento cuando la potencia de salida AC es del 10% es 77 minutos aproximadamente. En las mismas condiciones de medida, el Sunny Boy tarda 76 minutos. Por lo tanto, en términos temporales, podemos decir que son bastante similares. Es decir, que la pendiente de la curva de rendimiento en función del tiempo es para ambos prácticamente la misma. Sin embargo, en función de la potencia es mayor en el Sunny Boy que en el Steca Grid, evidentemente, el Sunny Boy soporta mayores valores de potencia, por lo tanto tardará más en alcanzar el rendimiento máximo.

8.5.-TABLAS COMPARATIVAS.

A modo de resumen final, vamos a comparar cuantitativamente los valores experimentales obtenidos en el laboratorio. En este epígrafe, se van a utilizar los valores de rendimiento europeo y rendimiento californiano descritos en capítulos anteriores.

- Rendimiento máximo:

Inversor	η max	η max fabricante
Steca Grid 300	95,909 %	94,8%
Sunny Boy 1100	92,529%	93,0%

Tabla 8.1. Valores comparativos de rendimiento máximo

Los rendimientos medidos experimentalmente se distancian relativamente de los facilitados por el fabricante. Es justo decir que las condiciones de medida en el caso del Steca Grid 300 han sido en operación de sobrepotencia, por tanto la relación entre potencia de entrada y potencia de salida no es la misma que en condiciones normales de medida. Estas condiciones normales si se dan en el SB1100, es por ello que la diferencia entre rendimiento experimental e ideal es mucho menor.

La conclusión de estos valores, objetivamente hablando, es que el inversor más eficaz es el Steca Grid 300, ya que su rendimiento ha resultado mayor incluso que el ideal. Sin embargo, hay ciertas condiciones que influyen en estos valores, como ya se ha comentado,

el uso de transformadores de frecuencia reduce los valores de rendimiento, pero a cambio protege a la red eléctrica e impide que las inyecciones de corriente continua a esta estén fuera de lo que permite la normativa.

- Rendimientos europeo y californiano

η según potencia nominal AC (%)	Steca Grid 300	Sunny Boy SB1100
$\eta_{5\%}$	75,289	82,235
$\eta_{10\%}$	90,170	88,13
$\eta_{20\%}$	89,829	90,693
$\eta_{30\%}$	92,639	91,966
$\eta_{50\%}$	93,178	92,890
$\eta_{75\%}$	94,382	92,227
$\eta_{100\%}$	93,768	--

Tabla 8.2. Valores representativos η (%) europeo y californiano

$$\eta_{\text{europeo}} = 0.03 \eta_{5\%} + 0.06 \eta_{10\%} + 0.13 \eta_{20\%} + 0.1 \eta_{30\%} + 0.48 \eta_{50\%} + 0.2 \eta_{100\%}$$

Ecuación 8. 2. Rendimiento europeo

$$\eta_{\text{californiano}} = 0.04 \eta_{10\%} + 0.05 \eta_{20\%} + 0.12 \eta_{30\%} + 0.21 \eta_{50\%} + 0.53 \eta_{75\%} + 0.05 \eta_{100\%}$$

Ecuación 8.3. Rendimiento californiano

Inversor	η_{europeo}	$\eta_{\text{eu fabricante}}$	$\eta_{\text{californiano}}$	$\eta_{\text{ca fabricante}}$
Steca Grid300	92,089%	93,4%	93,493%	-----
Sunny Boy SB1100	73,328%	91,6%	87,483%	-----

Tabla 8.3. Valores del rendimiento (%) calculados

En este estudio se ve claramente como el SB1100, al carecer de datos en torno al $\eta_{100\%}$ (valor del rendimiento cuando la potencia nominal expresada en tanto por ciento alcanza el valor de 100%), ve reducido su valor de rendimiento tanto europeo como californiano. Sin embargo, los valores de rendimiento a otras escalas son bastante aceptables. En este caso podemos deducir que el inversor SB1100 no alcanza 100% de la potencia nominal debido a

que el valor de la potencia nominal que nos ofrece el fabricante, en este caso 1000 W, es mucho mayor del producido por las placas $190 \times 4 = 760$ W. Se ha comprobado, también, el valor de $\eta_{100\%}$ considerando como potencia nominal los 760 W, y tampoco encontramos valores para este rendimiento, aunque sí a valores muy cercanos, entorno al 95% de potencia nominal. Si aproximamos, entonces el valor del $\eta_{100\%}$ al obtenido para 95%, el nuevo rendimiento europeo para una $P_{nom} = 760$ W es 90.34% y el californiano es de 91.37%. En la Tabla 8.4 vienen reflejados los nuevos valores.

Inversor	$\eta_{europeo}$	η_{eu} fabricante	$\eta_{californiano}$	η_{ca} fabricante
Steca Grid300	92,089%	93,4%	93,493%	-----
Sunny Boy SB1100	90,340%	91,6%	91,375%	-----

Tabla 8.4. Valores del rendimiento (%) calculados*

- Velocidad en alcanzar el rendimiento máximo

Otro dato de interés es ver la rapidez con que ambos inversores alcanzan los puntos de rendimiento máximo. En la tabla siguiente adjuntamos el resumen de los datos experimentales.

	SunnyBoy 1100	Steca Grid 300
$\eta_{10\%}$	82.235	90,170
η_{max}	92,529	95,909
Hora $\eta_{10\%}$	08:43 h	09:02 h
Hora $\eta_{10\%}$	10:00 h	10:18 h
∇ Tiempo	77 min	76 min

Tabla 8.5

- Comparativa con otros ensayos

Una vez conocidos los valores del rendimiento para estos dos inversores, vamos a proceder a compararlos con otros inversores ensayados en el CIEMAT por Miguel Alonso Abella y F. Chenlo, del departamento de energías renovables⁽¹⁹⁾. Se han escogido inversores de similares características.

Fabricante	Modelo	Pnom	Vdc	Ren max	Ren eur	Trafo
Kyocera	KC3.6i	3000 W	100-350 V	94.2	93.4	HF
Siemens	Sitop 2300	2300 W	200-630 V	94	93	No
SMA	Sunny Boy 2500	2500 W	224-600 V	94.1	93.2	LF

Tabla 8.6. Comparativa de inversores. Fuente: CIEMAT⁽¹⁹⁾

Fabricante	Modelo	Pnom	Vdc	Ren max	Ren eur	Trafo
Steca	Steca Grid 300	300 W	45-135 V	95.9	92.1	No
SMA	Sunny Boy 1100	1000 W	139-320 V	92.5	90.34	LF

Tabla 8.7. Comparativa de inversores. Fuente: Carlos III de Madrid

En el caso de inversores sin transformador, el Steca Grid 300 tiene más rendimiento máximo aunque menos rendimiento europeo, mientras que el SB1100 alcanza menores valores en ambos parámetros. Aún así, los valores obtenidos en el laboratorio son bastante satisfactorios, y al conocer otros valores de otros ensayos podemos comprobar como el rendimiento general de este tipo de dispositivos, en todos los casos, supera el 90%.



Capítulo 9:

CONCLUSIONES

9.-CONCLUSIONES

La economía energética tradicional se ve enfrentada a algunos retos, los precios de los combustibles suben de manera prácticamente imprevisible, la política presiona en la reducción de emisiones de CO₂, y cada vez en más países la población empieza a tenerle la misma antipatía a las centrales de carbón o nucleares.

Por eso es cada vez más necesario utilizar fuentes de energía renovables. La fotovoltaica ya está hoy en día en el umbral de alcanzar competitividad con los precios de la electricidad doméstica en muchos países. En España, se ha calculado que una prima progresiva, que subiría paulatinamente en el periodo de subvención, podría conseguir que ya hoy mismo se estuviera por debajo del precio de la electricidad doméstica. Es necesario fomentar que los ciudadanos de a pie se involucren y conozcan la posibilidad de compensar su balanza de consumo energético, sólo así será posible movernos en cifras de MW instalados similares a países como Japón o Alemania.

Con este proyecto se ha querido demostrar que los dispositivos actuales, en el campo de la fotovoltaica, son eficaces, y que con ciertas mejoras podrán serlo, en un futuro, todavía algo más. Se hace necesario aportar a la investigación esfuerzo y dinero para que consigamos realizar un cambio energético de tal forma que aprovechemos al máximo, sin desgastarlos, los recursos naturales que encontramos alrededor.

En el caso de los inversores estudiados, vemos que se puede aportar a la red valores de potencias, según el panel fotovoltaico instalado, desde los 400W en adelante, y con una eficacia superior al 92% en todos los casos. Con grandes campos fotovoltaicos se pueden abastecer poblaciones enteras, aunque todavía queda mucho por mejorar, ya que, por ejemplo, la producción de obleas de silicio supone un gasto monetario y ecológico bastante elevado.

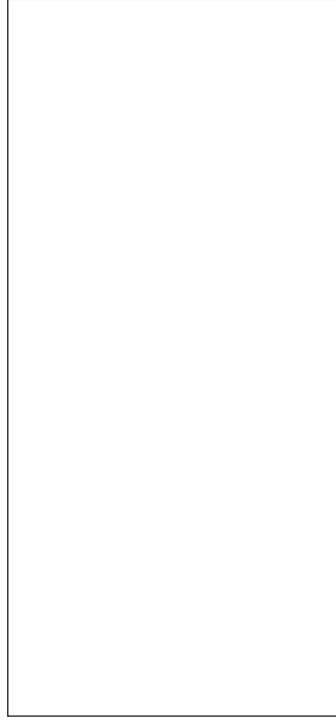
Como conclusión final a este estudio comparativo se tiene que , evidentemente, el de mayor rendimiento es el inversor Steca Grid 300, pero si la instalación que se quiere realizar es de gran potencia, se recomienda, encarecidamente, el inversor Sunnyboy 1100.

Capítulo 10:

ANEXOS

DISTRIBUIDOR
DISTRIBUTOR

ATERSA

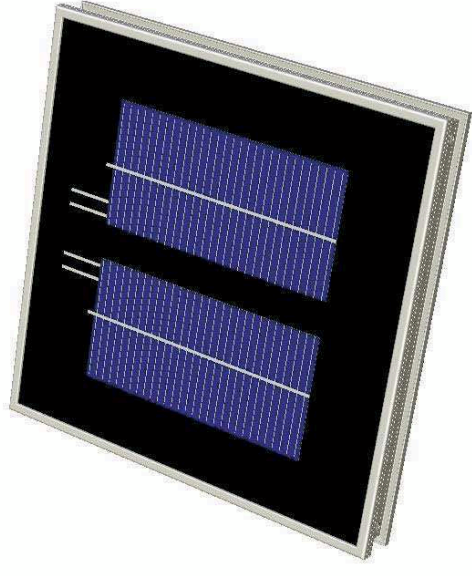


MADRID 28045
C/ Embajadores, 187-3º
tel. +34 915 178 580
tel. +34 915 178 452
fax. +34 914 747 467

ALMUSAFES (VALENCIA) 46440
Polígono Industrial Juan Carlos I
Avda de la Foia, 14
tel. 902 545 111
fax. 902 547 530
e-mail: atersa@atersa.com

CÓRDOBA 14007
C/ Escritor Rafael Pavón, 3
tel. +34 957 263 585
fax. +34 957 265 308

(www.atersa.com)



Célula Calibrada / Compensated Compensada / Calibrated cell



Sensores de Radiación

Radiation Sensors



Fecha de edición: 10/06/04
Fecha última revisión: 16/05/07
Referencia: MU-CelCal-B

INSTALACIÓN E

Los cables manguera utilizados, tendrán un diámetro exterior comprendido entre 4,5 a 10mm, siendo éste el rango mínimo y máximo de ajuste admitido por el prensa, asegurando así la estanqueidad de la caja. El cable debe ser para exteriores, apantallado, de 1kV y protegido a los UV. La sección de cable admisible en las bornas esta entre 0,22 y 1,5mm².

Este equipo cumple con las normas de marcado CE respecto a la radiofrecuencia emitida e inmunidad. En sistemas de telecomunicaciones con frecuencias de emisión superiores a 230MHz consultar con nuestro departamento técnico.

CONFIGURACIÓN

La célula calibrada permite configurar sus salidas como :

Dos salidas de señal de 65mV DC redundantes y eléctricamente aisladas (para detectar obstáculos de suciedad en el cristal).

Configuración 1.

Una salida de 100mV DC. **Configuración 2.**

SYSTEM GB

The cables used, will have an exterior diameter between 4,5mm and 10mm, since this is the minimum and maximum adjustment range admitted by the cable glands, in order to ensure the box IP value. The cable must be for outdoor use, shielded, for 1kV and UV protected. The cable section admitted by the connection terminals is within the range of 0,22 and 1,5mm².

This device fulfils the CE mark norms regarding immunity and emitted radiofrequency. For telecommunication systems with emitted frequencies in the range above 230MHz please ask the technical department.

CONFIGURATION

The calibrated cell the following output configurations:

Two 65mV DC redundant output signals, independents and electrically isolated (in order to find out dirtiness on the glass).

Configuration 1.

One 100mV DC output signal.

Configuration 2.

CARACTERÍSTICAS

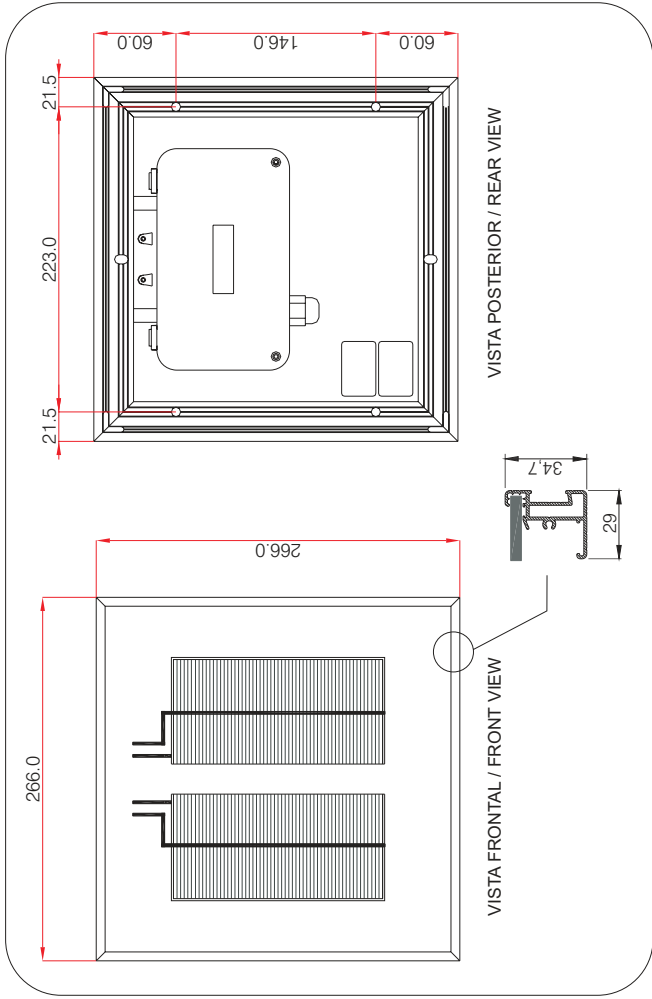
Las salidas de señal dependen única y exclusivamente de la radiación, la influencia de la temperatura es despreciable (10 ppm/K)

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	Configuración 1	Configuración 2
Relación Tensión - Radiación	65 mVdc por salida = 1000W/m2 ± 2,1%	100 mVdc = 1000W/m2 ± 2,2%
Impedancia Conectada a la Salida	>= 10MOhms *	
* NOTA: Salidas conectadas a dispositivos de impedancia de entrada de <10MOhms, consultar.		
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		
Dimensiones (mm.)	266x266x35	
Peso (aprox.)	1.60 Kg.	
Especificaciones eléctricas medidas en STC. * NOTA: Los datos contenidos en esta documentación están sujetos a modificación sin previo aviso.		

FEAUTURES

The output signals depends only of the radiation factor, the temperature dependence is negligible (10 ppm/K)

Configuration 1		Configuration 2
ELECTRICAL FEATURES	Voltage - Radiation correspondence	100 mV/dc = 1000W/m2 ± 2,2%
	Impedance Connected to the Output	>= 10MOhms *
* NOTE: Outputs connected to more than 10MOhms input impedance, ask the technical department.		
PHYSICAL FEATURES	Dimensions (mm.)	266x266x35
	Weight (approx.)	1.60 Kg.
Electrical specifications at STC. *NOTE: The data included within this documentation might be changed without previous notifying.		



GARANTIA

El equipo dispone de DOS AÑOS de garantía contra todo defecto de fabricación, incluyendo en este concepto las piezas y la mano de obra correspondiente. (Para una información más exhaustiva de los términos de la garantía, pueden consultar nuestra página web: www.atersa.com).

GUARANTEE

The TWO-YEARS warranty covers all manufacturing defects, parts and labour inclusive. (For more detailed information of the terms and conditions of the guarantee, consult our web page: www.atersa.com).

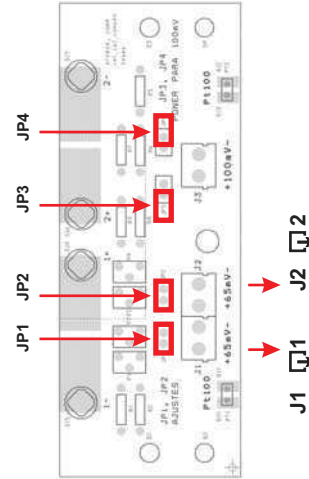
CONFIGURACIÓN / CONFIGURATION 1 :

2 65mV : J1 y J2

Configuración / Configuration:

* JP1 - JP2

* JP3 - JP4



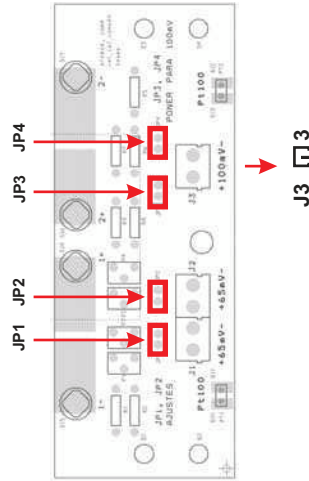
CONFIGURACIÓN / CONFIGURATION 2 :

1 100mV : J3

Configuración / Configuration:

* JP1 - JP2

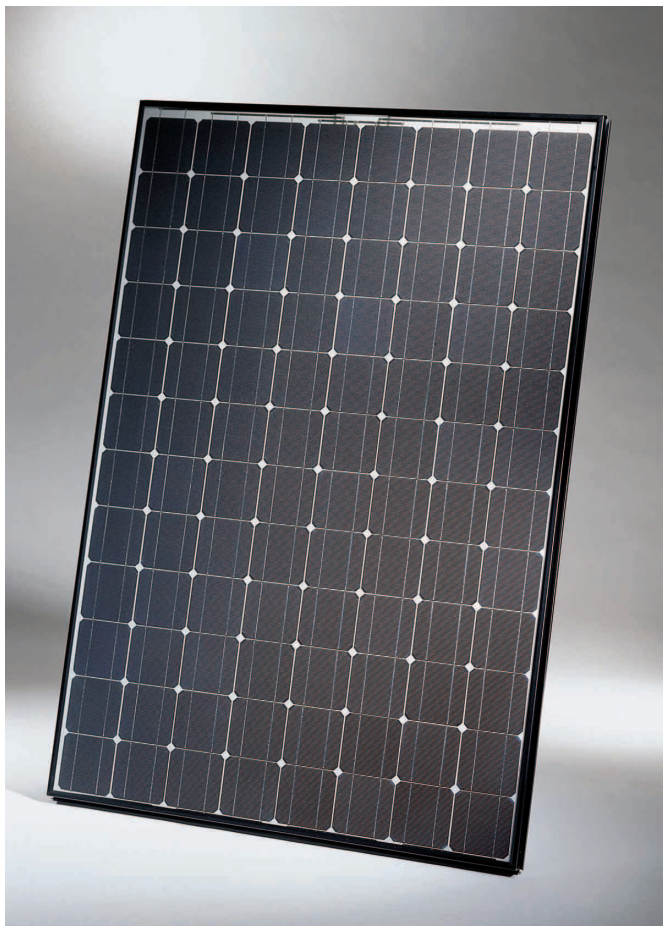
* JP3 - JP4



HIT PHOTOVOLTAIC MODULE HIP-190BE3



The SANYO HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) solar cell is made of a thin mono crystalline silicon wafer surrounded by ultra-thin amorphous silicon layers. This product provides the industry's leading performance and value using state-of-the-art manufacturing techniques.



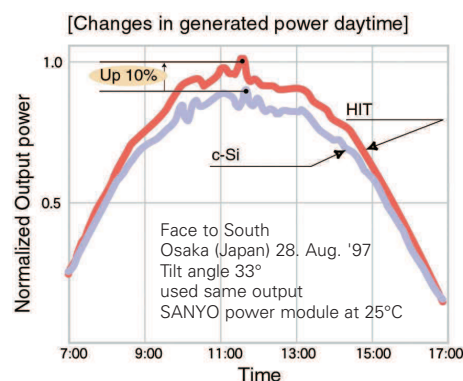
Benefit in Terms of Performance

High efficiency cell: 18.5%, Module: 16.1%

The HIT cell and module have the world's highest level of conversion efficiency in mass production.

High performance at high temperatures

Even at high temperatures, the HIT solar cell can maintain higher efficiency than a conventional crystalline silicon solar cell.



Benefit to the Environment

Low production energy

HIT solar cell requires only 200°C for the junction forming process (conventional crystalline silicon solar cell: about 900°C). This helps save energy.

Thin design

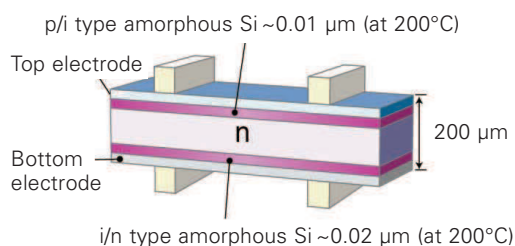
The HIT solar cell is only about 200 μm thick. (A conventional crystalline silicon solar cell is about 350 μm thick.) This helps save on silicon materials.

Benefit in Terms of Quality

High quality in accordance with ISO 9001 and 14001 standards

HIT solar cells and modules are subject to strict inspections and measurements to ensure compliance with electrical, mechanical and visual criteria.

HIT Solar Cell Structure



Supported by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) in Japan.



Electrical and Mechanical Characteristics

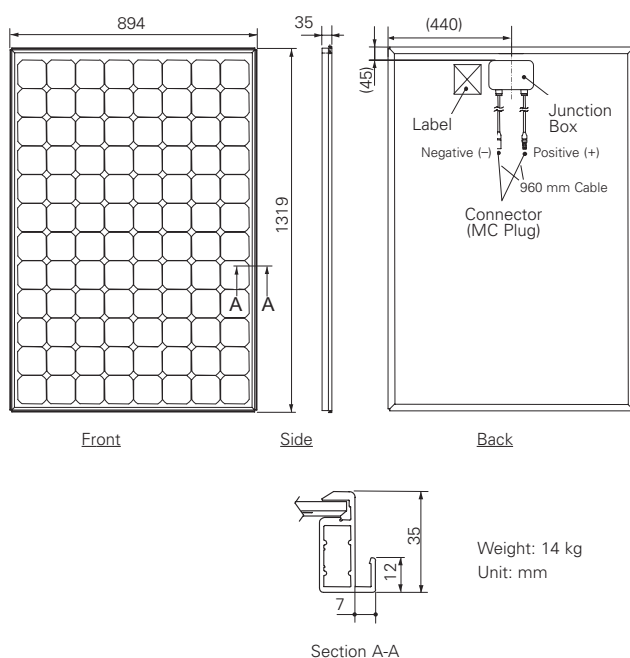
HIP-190BE3

Electrical data

Maximum power (Pmax)	[W]	190
Max. power voltage (Vmp)	[V]	54.8
Max. power current (Imp)	[A]	3.47
Open circuit voltage (Voc)	[V]	67.5
Short circuit current (Isc)	[A]	3.75
Warranted minimum power (Pmin)	[W]	180.5
Output tolerance	[%]	+10/-5
Maximum system voltage	[V]	760
Temperature coefficient of Pmax	[% / °C]	-0.30
Voc	[V / °C]	-0.169
Isc	[mA / °C]	0.86

Note 1: Standard test conditions: Air mass 1.5, Irradiance = 1000W/m², Cell temperature = 25°C
 Note 2: The values in the above table are nominal.

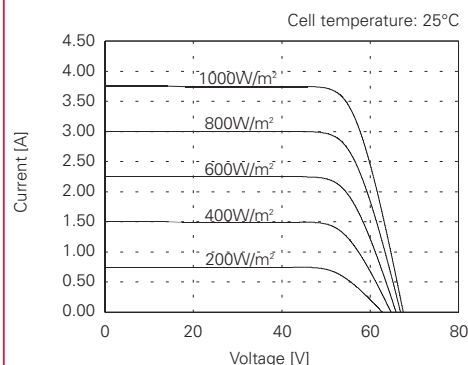
Dimensions and weight



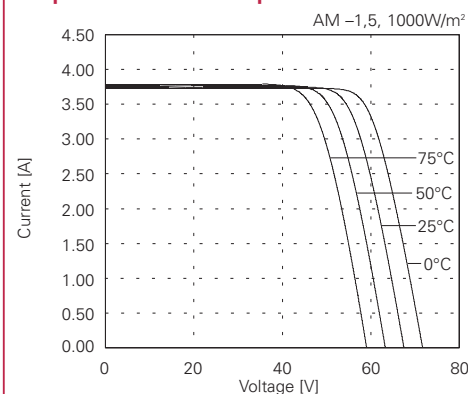
Warranty

Power output: 20 years (80% of minimum output power)
 Product workmanship: 2 years
 (Based on contract terms.)

Dependence on irradiance



Dependence on temperature



Certificates



IEC 61215



• Qualified, IEC 61215
 • Safety tested, TUV-Spec 612.572.9
 • Periodic inspection



Electrical Protection Class II

Please consult your local dealer for more information.



Caution! Please read the operating instructions carefully before using the products.

Owing to our policy of continual improvement the products covered by this brochure may be changed without notice.

SANYO Energy
(Europe) Corporate GmbH
 Stahlgruberring 4
 81829 Munich, Germany
 TEL: +49-(0)89-460095-0
 FAX: +49-(0)89-460095-190
 http://www.sanyo-energy-europe.com
 email: info.europe@sanyo-energy.com

SANYO Energy (U.K.) Co., Ltd.
 Masterson House, 30 - 31 Mark Road,
 Hemel Hempstead,
 Hertfordshire HP2 7BW
 TEL: +44-(0)1442-21 31 21
 FAX: +44-(0)1442-21 20 21
 http://www.sanyo-energy-europe.com
 email: info.europe@sanyo-energy.com

SANYO

SANYO Electric Co., Ltd
 Soft Energy Company
 5-5, Keihan-Hondori 2, Moriguchi,
 Osaka 570-8677, Japan
 TEL: +81-(0)6-6994-7282
 FAX: +81-(0)6-6994-7289
 http://www.sanyo.co.jp



StecaGrid 300/500

Los inversores StecaGrid 300/500 fueron desarrollados para que el aprovechamiento de la energía solar fuera lo más sencillo posible. Son fáciles de instalar, de ampliar y se adaptan de forma óptima a las condiciones locales de irradiación.

Los inversores StecaGrid 300/500 resultan especialmente adecuados para pequeñas instalaciones eléctricas solares entre 300 y 3.600 W. La serie de inversores MiniString StecaGrid está formada por inversores StecaGrid 300 y StecaGrid 500 con una potencia nominal de entre 300 y 500 W que pueden ampliarse y combinarse entre sí. Son posibles las dimensiones de sistema de entre 300 y 3.600 W. StecaGrid dispone de un controlador de PMP independiente y alcanzan coeficientes de rendimiento muy altos de hasta el 95,8 %. Gracias a la modularidad del sistema, estos inversores son especialmente adecuados para sistemas con tejados de distintas orientaciones o parcialmente sombreados.

Características:

- Flexibles y ampliables
- Coeficiente de rendimiento hasta el 95,8 %
- Principio MiniString
- Bajo peso
- Instalación sencilla
- Un StecaGrid Control por sistema es necesario



StecaGrid Control

StecaGrid Control controla un sistema hasta una potencia de 3.600 Vatios. Representa los kWh producidos y el estado del sistema y cuenta también (opcionalmente) con funciones de seguridad integradas (ENS).



StecaGrid Remote

Adicionalmente al StecaGrid Control se ofrece una unidad de comunicación externa inalámbrica:

el StecaGrid Remote.

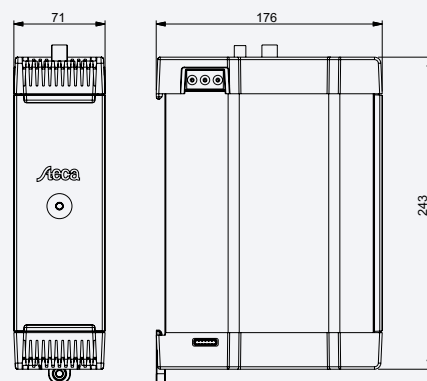
Muestra la potencia actual, el estado del sistema y la energía generada al día, a la semana, al mes y al año.



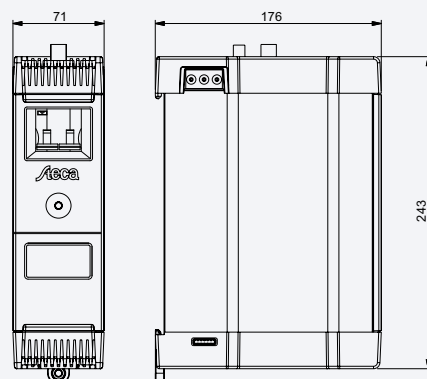
Modular y flexible

La serie de productos StecaGrid 300/500 tiene una estructura modular, es fácil de montar y se adapta fácilmente a sus necesidades. Al efectuarse un sistema a tres fases éste puede ampliarse ilimitadamente en cualquier momento y por lo tanto, adaptarse de forma flexible a sus inversiones en su instalación eléctrica solar.

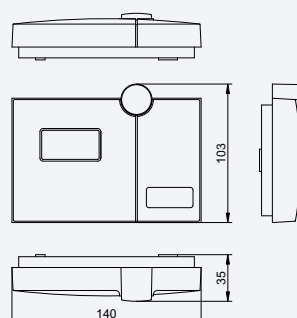
	StecaGrid 300	StecaGrid 500
Datos de entrada CC		
Rango de tensión de entrada	45 V a 135 V	45 V a 230 V
Rango MPPT	45 V a 100 V	75 V a 170 V
Tensión Máx. de inicio	100 V	170 V
Potencia Máx. de entrada	320 W *	530 W *
Corriente Máx. de entrada	5 A *	
Conector CC	Multi-Contact MC 3 (Solarline 1) o Tyco Solarlok	
*) El aparato cuenta con una función de protección ante sobrecargas, una mayor potencia de entrada y/o una mayor corriente disponibles no se utilizan.		
Datos de salida CA		
Potencia nominal	300 W	500 W
Tensión nominal	230 V	
Tipo de red	L/N + PE, monofásica	
Frecuencia de red	50 Hz	
Máximo coeficiente de rendimiento	94,8 %	95,8 %
Coeficiente de rendimiento europeo	93,4 %	94,5 %
Reducción de potencia en caso de potencia total	a partir de 40 °C de temperatura ambiente	
Consumo del inversor durante la noche	0 W	
Conector CA	Wieland Electric GST 18i3V	
Datos generales		
Separación galvánica	no	
Alimentación interna	del módulo solar (sin corriente en standby)	
Peso	1,4 kg	
Rango de temperatura ambiente	-20 °C a 45 °C	
Grado de protección	IP 20 (interior)	
Dimensiones (alto x profundo x ancho)	243 x 176 x 71 mm	
Normas y verificaciones		
Marcas de verificación	CE	
	StecaGrid Control N	
Interruptor de seguridad en caso de falla de corriente	30 mA CA; **	
Interruptor principal	si	
Display	Display	
Peso	1,75 kg	
Consumo propio	2,4 W	
Dimensiones (alto x profundo x ancho)	243 x 176 x 71 mm	
**) Sensibilidad CC adecuada para StecaGrid 300/500.		
Normas y verificaciones		
Marcas de verificación	CE	
	StecaGrid Remote	
Display	de StecaGrid Control	
Transceptor	868 MHz ISM	
Alimentación	2x LR06 (AA)	
Dimensiones (alto x profundo x ancho)	103 x 35 x 140 mm	
Normas y verificaciones		
Marcas de verificación	CE	

Datos técnicos

StecaGrid 300/500



StecaGrid Control



StecaGrid Remote

Seguro

- Seccionador de potencia de CC integrado ESS
- Separación galvánica

Montaje en intemperie

- Para montaje interior y en intemperie
- Rango de temperatura ampliado

Fiable

- Servicio SMA en todo el mundo y línea de atención al cliente
- Amplio programa de garantía de SMA



SUNNY BOY 1100 / 1700

Compactos

A la hora de configurar una instalación solar se busca conseguir un ajuste óptimo entre el rendimiento del generador solar y el del inversor. Para ello es indispensable disponer de una amplia gama de inversores. Con más de 30.000 equipos vendidos en todo el mundo, los modelos compactos Sunny Boy 1100 y Sunny Boy 1700 son dos de nuestros modelos de más éxito. Con la tecnología más innovadora, estos "pequeños" Sunny Boy ahora también incluyen la separación de red SMA grid guard, de aplicación en todo el mundo. La interfaz garantiza una mayor seguridad en el funcionamiento de la instalación fotovoltaica y permite la inyección a la red eléctrica pública desde cualquier lugar.

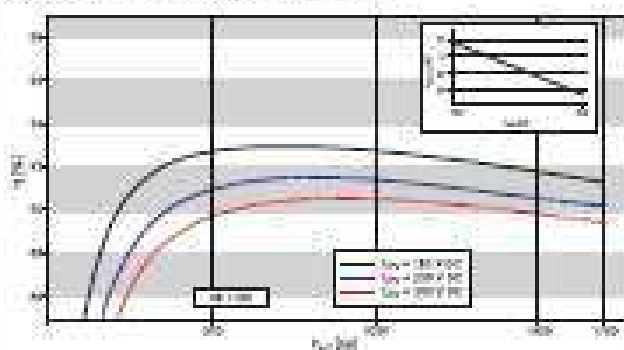
Datos técnicos

SUNNY BOY 1100 / 1700

	SB 1100	SB 1700
Entrada (CC)		
Potencia máxima de CC	1210 W	1850 W
Tensión máx. de CC	400 V	400 V
Rango de tensión fotovoltaica, MPPT	139 V - 320 V	139 V - 320 V
Corriente máx. de entrada	10 A	12,6 A
Número de seguidores de MPPT	1	1
Número máximo de strings (en paralelo)	3	3
Salida (CA)		
Potencia nominal de CA	1000 W	1550 W
Potencia máxima de CA	1100 W	1700 W
Corriente máx. de salida	5,6 A	8,6 A
Tensión nominal de CA / rango	230 V - 240 V / 180 V - 240 V	230 V - 240 V / 180 V - 240 V
Frecuencia de red de CA (de ajuste automático) / rango	50 Hz / 60 Hz / ± 4,5 Hz	50 Hz / 60 Hz / ± 4,5 Hz
Factor de potencia (cos φ)	1	1
Conexión de CA	monofásica	monofásica
Rendimiento		
Rendimiento máx.	93,0 %	93,5 %
Rendimiento europeo	91,6 %	91,8 %
Dispositivos de protección		
Protección contra polarización inversa (DC)	●	●
Separador de carga de CC ESS	●	●
Resistencia al cortocircuito (CA)	●	●
Monitorización de temperatura	●	●
Monitorización de red (SMA grid guard)	●	●
Cris separación galvanica	●	●
Datos generales		
Dimensiones (ancho x alto x fondo) en mm	434 / 295 / 214	434 / 295 / 214
Peso	23 kg	23 kg
Rango de temperatura de servicio	-25 °C ... +60 °C	-25 °C ... +60 °C
Nivel de ruido (Elycos)	≤ 39 dB(A)	≤ 46 dB(A)
Consumo característico funcionamiento (stand-by) / nocturno	≤ 4 W / 0,1 W	≤ 5 W / 0,1 W
Topología	transformador de baja frecuencia	transformador de baja frecuencia
Sistema de refrigeración	convección	convección
Lugar de montaje: interior / en intemperie (IP65)	● / ●	● / ●
Características		
Conexión de CC: MC3 / MC4 / Tyco	● / ○ / ○	● / ○ / ○
Conexión de CA: conexión	●	●
Display LCD	●	●
Color de la tapa: rojo	●	●
Interfaz: RS485 / por radio	○ / ○	○ / ○
Vida útil: 5 años / 10 años	● / ○	● / ○
Certificados y autorizaciones	www.SMA-iberica.com	www.SMA-iberica.com
● Opcional de serie ○ Opcional		

Datos en condiciones nominales - enero de marzo 2009

Curva del coeficiente de rendimiento



Accesorios



Se recomienda para la instalación de los sistemas PV y para cargar los sistemas.



Se recomienda para la instalación de los sistemas PV y para cargar los sistemas.



Se recomienda para la instalación de los sistemas PV y para cargar los sistemas.



Se recomienda para la instalación de los sistemas PV y para cargar los sistemas.

Se recomienda para la instalación de los sistemas PV y para cargar los sistemas.

1 to 8 Channel Precision Power Meter LMG500



- Accuracy 0.03%
- Bandwidth 10MHz (DC, 0.05Hz to 10MHz)
- 3MSamples/s simultaneously on each U and I channel
- Sampling absolutely gapless with evaluation of all sampling values, therefore captures all inrush currents and signal changes
- Harmonics and interharmonics up to 50kHz/1MHz
- Flicker, interactions between network and load

To improve Motors, Transformers,
Frequency Inverters, Power Electronics,
Power Supplies, Lightings, Automotives
in Efficiency, Reliability,
Electromagnetic Compatibility and Life-Cycle Costs



LMG – A Synonym for Precision Power Measurement

Precision Power Meters (German: Präzisions-LeistungsmessGeräte) of the series **LMG** by ZES ZIMMER – LMG90 and LMG95 for single phase, LMG310, LMG450 and **LMG500** for multiphase measurements – have been proved in many various applications. The character string **LMG** has become a synonym for precise and wide band measurement of electrical power. The magnitudes correlated with electrical power like current, voltage, harmonics, flicker and energy have to be acquired precisely as to optimise your products in efficiency, reliability, electromagnetic compatibility (EMC), life-cycle costs.

LMGs are used for measurement at:

- Components, e.g. ferrite cores, semiconductors, capacitors
- Devices, e.g. motors, inverters, lightings
- Installations and parts of those, also power grids to identify their parameters
- CE-mark tests on devices, supplied by power sources (simulating an ideal power network), to investigate the feedback of harmonics and flicker (load variations)
- Interactions of network and appliance

The most important highlight features of the LMG500:

- Group delay between U- and I- measuring input <3ns as standard to assure very precise measurement at low $\cos\varphi$ and/or high frequencies
- High dynamics in level control, ranges from 3V to 1000V/3200V_{peak}, 20mA to 32A/120A_{peak} in direct measurement only by a single pair of sockets each for voltage as well as for current input
- 3MSample/s, absolutely gapless sampling with evaluation of all sampling values
- Capturing transients and fast signal changes by event triggering which is always active in the background of the „normal mode“
- Harmonics and interharmonics up to 50kHz internal and up to 1MHz with an external PC
- Flicker measurement, interactions between network and load
- Modular with 1 to 8 power measuring channels
- Ergonomic operation shell for easy, intuitive use of the power meter
- Real-time evaluation of the measurements in numeric tables and diagrams
- Interfaces with high data transfer rate (IEEE488.2, RS232, USB, Ethernet)

Measuring inputs for ultimate requirements



- Separated HF current inputs I_{HF}^* : 150mA to 1.2A/DC to 10MHz

- Current inputs I^* , high dynamic of range: 20mA to 32A/120A_{peak} by only one socket pair, no need and incommode change of external shunts!



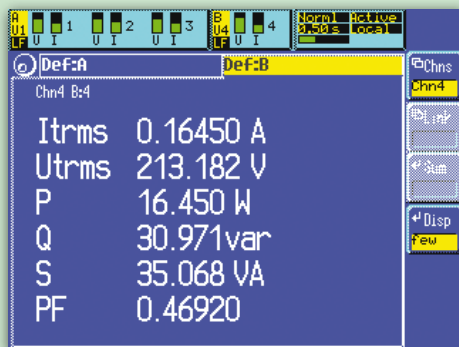
- Measuring with external sensors: Inputs I_{Sensor} and U_{Sensor} 30mV to 4V/DC to 10MHz

- Voltage inputs U^* : 3V to 1000V/3200V_{peak}

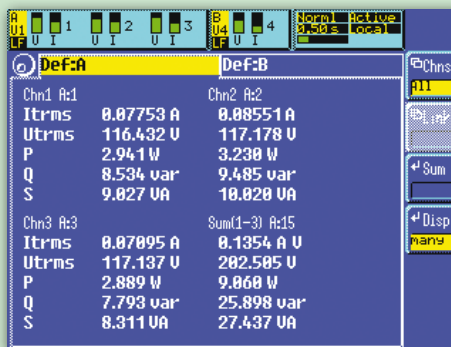
- Auxiliary voltage $\pm 15V$ and Identification of external sensors

- Very low capacity of measurement inputs against earth <30pF, thereby no interference of measured signals
- High bandwidth of 10MHz, shortest pulsed signals will be measured precisely
- All inputs isolated against each other and against earth (max. 1000V/CAT III)
- Gapless sampling and evaluation with 3MSamples/s at any duration, measuring cycle max. 60s
- Up to 8 power measuring channels with 8 channel compact meter or with two connected LMG500, all channels absolutely synchronously sampling with 3MSamples/s

Clear representation of measuring process



Measurement display with six values



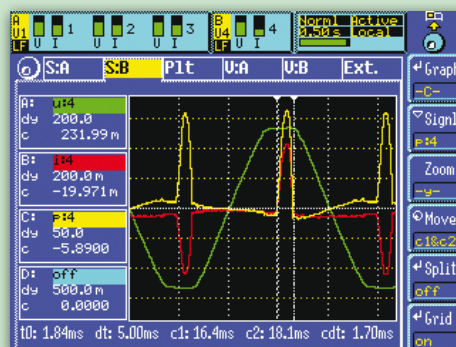
Measurement display with 20 values

- Status bar permanently displayed in all menus
- Measurement display for one or four power channels, alternatively with six or 20 values, 40 values or more to scroll

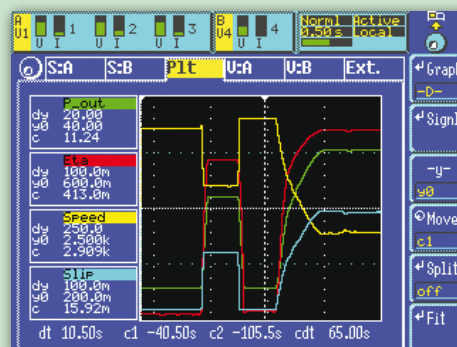


Status bar to overview active measurements

- Graphical display for wave form, line plot (trend display), phasor diagram and bar graph for harmonic analysis



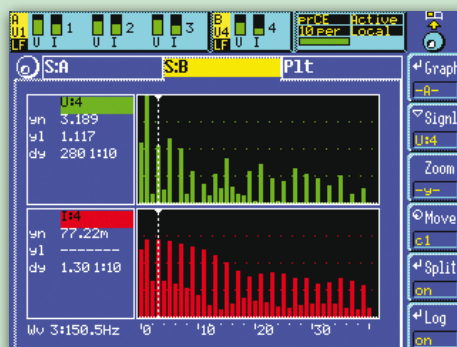
Graphical display for wave form



Line plot (trend display)



Phasor diagram

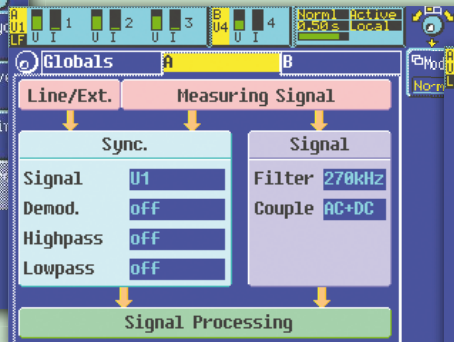


Representation of harmonics as bar graph

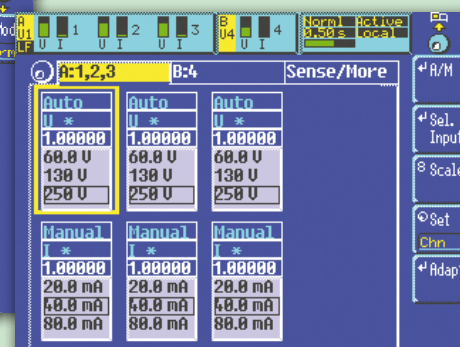
Device settings easily and intuitively over menues



Global settings, for example the star-delta conversion



Independent setting of synchronisation and measurement path



Selection of input sockets, scaling and measurement range

- Global settings
- Two independent filter sets to process synchronisation and measurement signal
- Manual or automatic setting of measurement ranges

Flexible use of the power measurement channels

Eight power measurement channels, each of them sampled absolutely synchronously with 3MSamples/s, can be provided:

- Either by a coupled 2nd device
- Or by the LMG500 with its compact 8 channel enclosure.

The current and the voltage paths of the power measurement channels are all isolated against each other and against

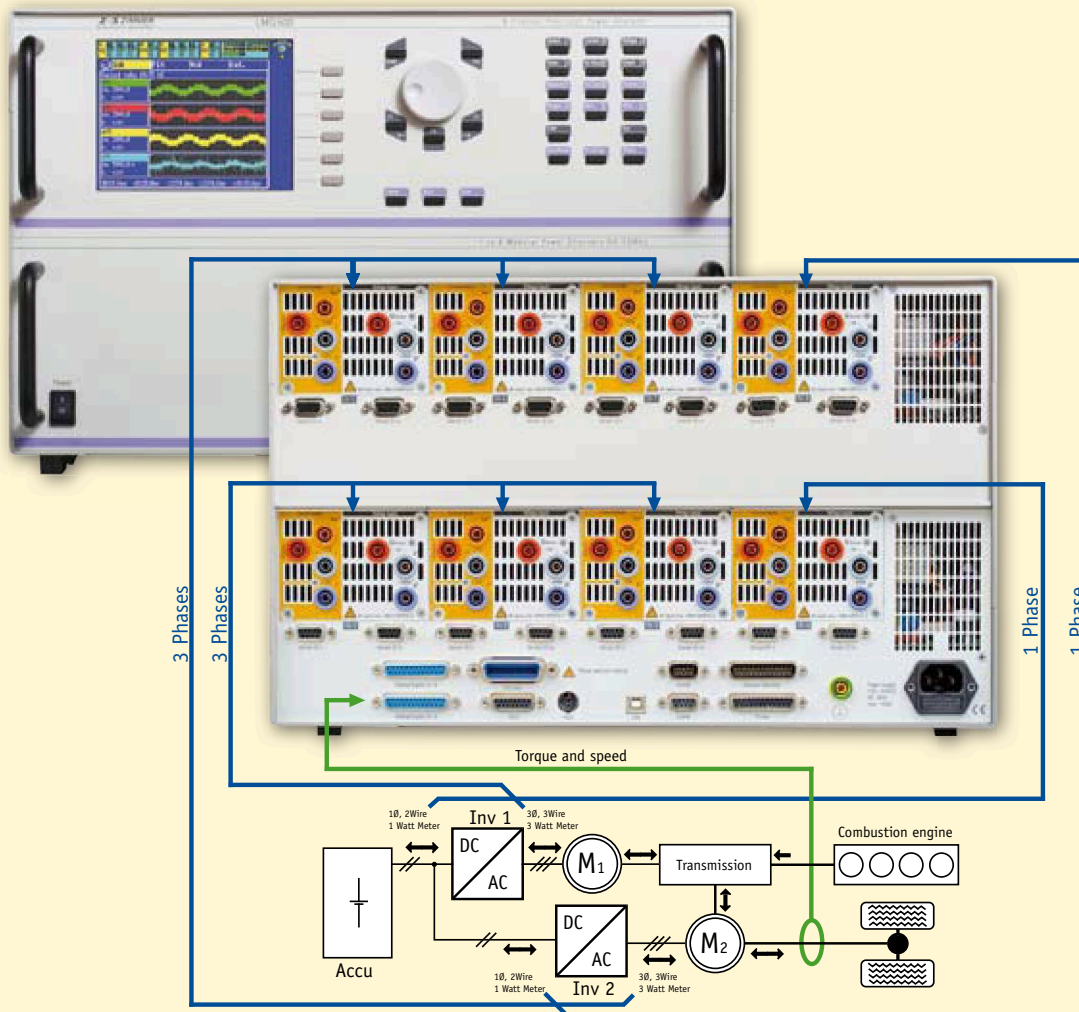
earth. This enables a free structuring of measurement on various power applications. The channels are arranged within up to 4 groups (see listed table): channels 1 to 4 (device 1) into group A and B and channels 5 to 8 (device 2) into group C and D. Each group is synchronised by a group specific signal. The synchronisation with an external signal or by „line“ is also possible. The settings of group A and B for certain wirings are independent to the settings of group C and D.

Channel No.	Ch. 1	Ch. 2	Ch. 3	Ch. 4	Ch. 5	Ch. 6	Ch. 7	Ch. 8
Group formation	A		B		C		D	
Possible wiring in the groups A to D	4Ø 4Wire				4Ø 4Wire			
	4Ø 5Wire				4Ø 5Wire			
	1Ø 2W	1Ø 2W	1Ø 2W	1Ø 2W	1Ø 2W	1Ø 2W	1Ø 2W	1Ø 2W
	3Ø 3Wire			1Ø 2W	3Ø 3W			1Ø 2W
	3Ø 4Wire				3Ø 4W			
	4Ø 4Wire				4Ø 4W			
	3Ø 3W (Aron)/2Ø 3W		3Ø 3W (Aron)/2Ø 3W		3Ø 3W (Aron)/2Ø 3W		3Ø 3W (Aron)/2Ø 3W	
	3Ø 3W (Aron)/2Ø 3W		1Ø 2W	1Ø 2W	3Ø 3W (Aron)/2Ø 3W		1Ø 2W	1Ø 2W

LMG500 – Compact with 8 Channels



Hybrid Automotive Drives



Optimisation of the energy management of hybrid automotive drives through analysing the power flow in various operation modes and conditions:

1. Automotive drives through combustion engine with or without booster of the inverter fed 3-phase electrical machines M1 and M2.

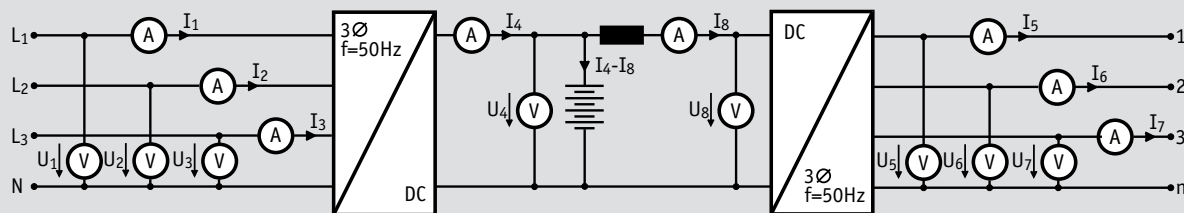
2. Energetic feedback of the braking energy into the battery.
3. Charging/recharging of the battery with combustion engine. Eight power measurement

channels and the process signal interface for torque and speed acquire exactly synchronously all data to precisely define efficiency.

LMG500 – Compact with 8 Channels



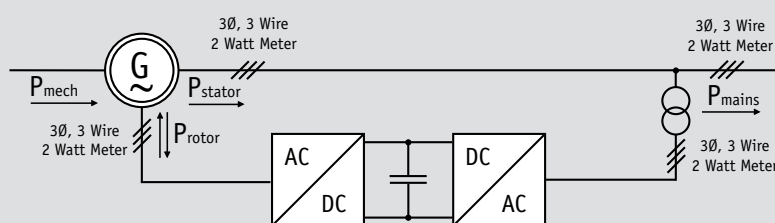
Uninterruptible Power Supply with DC-Link



Determination of efficiency at different operation points and conditions



Double Fed Asynchronous Machines



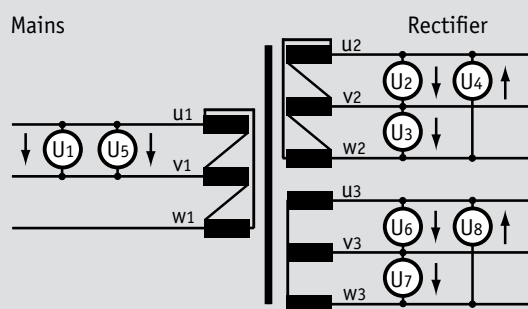
Stator power, rotor power, mains power, mains specific inverter power in each case with two watt meters in Aron circuit

Wind generators without gearing but with an extended range for revolution speed.

With fixed frequency at stator side and by setting the rotor frequency the double fed asynchronous machine can work as a generator with high efficiency at different wind speeds.



Transformers with Multiple Windings



Eight channel measurement at 12pulse rectifier transformer

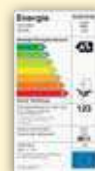
A three winding transformer with two by 30° electrically shifted outputs coils feeds two 6puls rectifiers. Thereby the primary winding suppresses harmonics, e. g. the 5th, 7th, 17th and 19th. The power measurement channels are configured as two groups with channels 1 and 5 in parallel. Therewith all measurement channels have the same phase reference and special rectifier transformers with (n·30°) deviating phase angles can be measured exactly.

Gapless Data Capturing



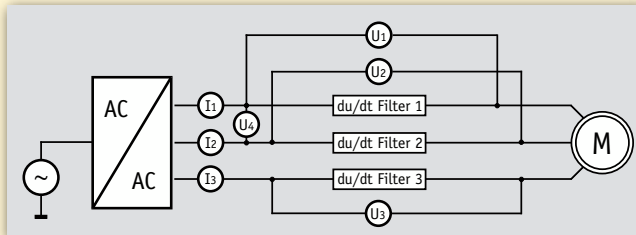
Energy Efficiency Classification for White Goods and PCs Standby Consumption

Benchmark like SPECpower_ssj2008 have been set up to ascertain power consumption of PCs and servers as a function of computing power. The LMG500 is listed for this. Standby consumption of domestic appliances are covered by standards like IEC 62301. The LMG500 fulfils this requirements. Low currents (μA) can be measured by using the shunt SH-100-P.

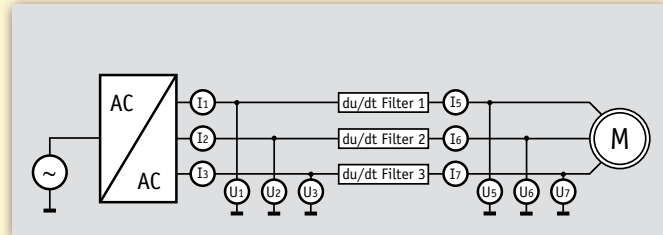




Power Loss of Filters for Frequency Inverters



Power loss through measurement across the filter

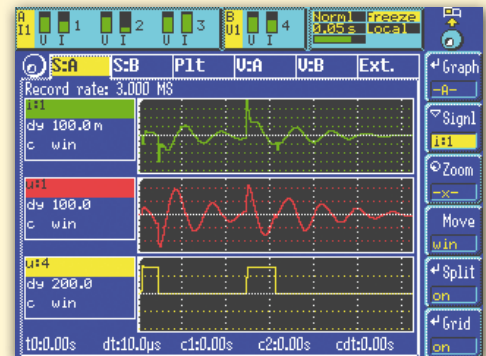


Power loss through difference measurement before and behind the filter

To increase efficiency of modern PWM frequency inverters fast switching semiconductors are used for minimising the switching losses in the output stage. However, the extremely steep voltage edges cause capacitive currents that stress bearings and isolation of the motors – this leads to an early break down.

Motor filters (e. g. du/dt-filters) attenuate the voltage edges in rise and fall, but generate power losses by the filters' transient oscillations (typ. >100kHz).

The high bandwidth and the very small group delay time of U-/I-measuring channels, <3ns as standard, allows extremely precise power loss measurements at those frequencies, also when measured across the filter at small $\cos\phi$.



L-L voltage U4 before the filter, voltage U1 across the filter and filter input current I1

Menu to compensate the delay time of external sensors

Currents >30A are measured by means of external sensors.

Wide band (>100kHz) current transducers for more than 100A, e. g. ZES ZIMMER type PSU, are used. The error caused through the group delay of the current transducer can be corrected by assistance of the delay time menu inserting the necessary time adjustment.

An outstanding tool with an easy to use menu.

A:1,2,3		B:4		Sense/No		Delay	
dU/ns	dI/ns	P/W	PF				
1 0	10	0.0403 kW	0.04799				
2 0	3	0.0452 kW	0.05418				
3 0	7	0.0379 kW	0.04831				
4 0	0	0.0000 kW	-----				
5 0	0	-----	-----				
6 0	0	-----	-----				
7 0	0	-----	-----				
8 0	0	-----	-----				

Delay time menu with compensation values for I in phase 1,2 and 3



Losses at lowest power factors of transformers, chokes and capacitors

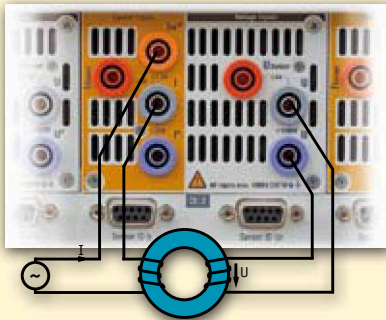
Power measurement up to 10MHz requires that current and voltage channels are so designed that delays between each other are very small. With the LMG500 they are less than 3ns and this means an angle error <1 μ rad at 50Hz. Due to this feature incorporated in the LMG500 it is best suited to measure the power losses of transformers, chokes and capacitors at very low power factor. The instruments with the standard factory settings fully comply to the requirements of these measurements. Options or adjustments are not necessary.

A calibration protocol [order no. KR L50 LPF] to proof measurement accuracies at power factors in the range of 0.01 can be supplied. Usually current or voltage transducers will be used for measuring power transformers. The phase angular error of this transducers can be corrected in the delay time menu which improves the accuracy of the measurement. Various definitions, e.g. IEC 60076-1, can handle the calculation of the corrected power. This can be calculated easily by using the powerful formular editor regarding to the requirements.

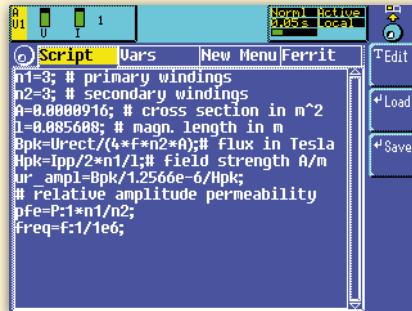


Source: Siemens AG

Core Losses and Parameters up to 10MHz



Circuitry



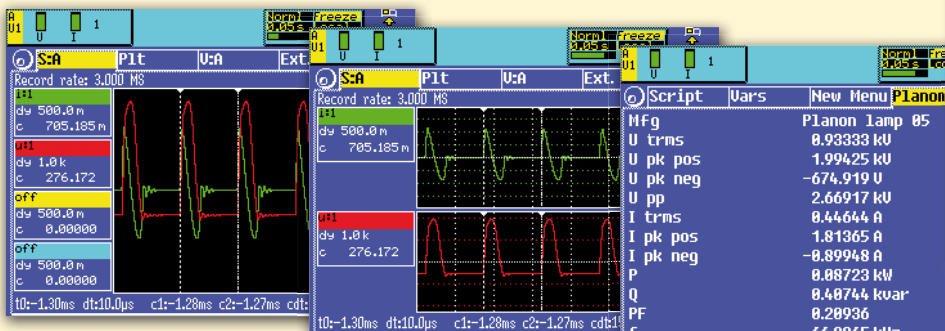
Script editor



Custom menu with numerical results

The power measured with the exciting current I and the induced voltage U at the sensor winding (core magnetisation voltage) directly yields the core losses without copper losses. With the rectified value of the sensor voltage U – a measure for the voltage-time area and therewith the induced flux Φ , the exciting current I and the geometric core data, the characteristic curves e.g. P(Bpk), Bpk(Hpk) can be generated. With the high-performance script editor the respective curve points are calculated measuring cycle by measuring cycle. Please request special application note.

Chopped Ballasts of Modern Lighting



Wave forms of current and voltage



Modern flat panel lamp

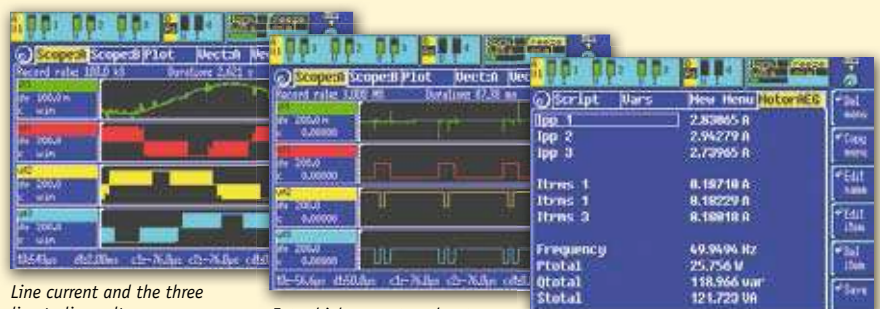
Custom menu with numerical results

Due to the low earth capacitance of the LMG500 measuring inputs (<30pF) pulsed currents and voltages can directly be measured and displayed on the LMG500 screen without any deviation. The figures shows the 70kHz pulses ($U_{pp}=2.5kV$, $I_{pp}=2.7A$) that permanently ignite and therewith keep ionisation of the gas discharge flat lamp (light tile) alive. Only based on the very small group delay difference of U and I channel, <3ns as standard, precise power measuring can be effected at this sample with its challenging signals.

Transient Currents at the Output of a Frequency Inverter

Through the high bandwidth of 10MHz high-frequency current peaks at the frequency inverter output can be sampled and visualised.

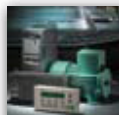
Transient current peaks are produced on each switching edge – currents which flow via the winding capacitance. They yield a multiple of the nominal current. You will get the high ratio from the values Ipp1 and Itrms1 from the shown custom menu.



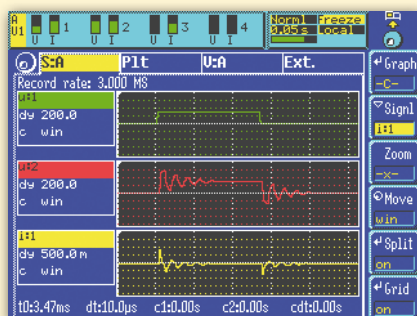
Line current and the three line to line voltages

Extra high current peaks at simultaneous switching edges

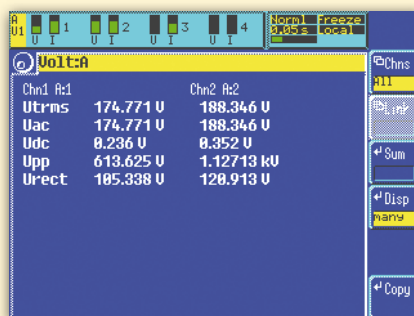
Custom menu with numerical results



Transient Voltages with Long Connecting Lines



Voltage at inverter output as well as voltage and current at motor with long connection cables

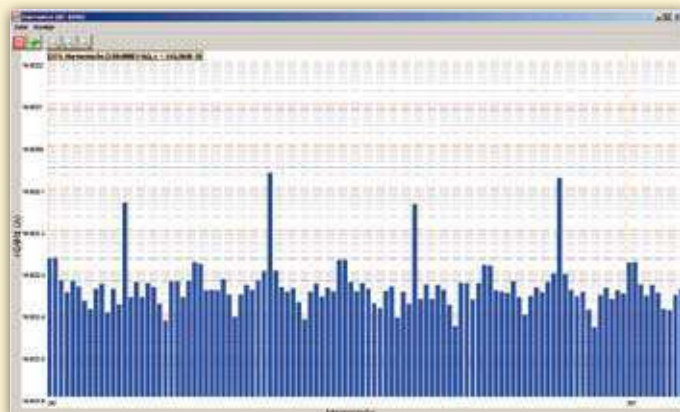


Easy to recognize: Double increase of peak value U_{pp}

Voltage peaks by reflexion occur on long connection cables between frequency inverter and motor. They attain up to the double of the transmitted voltage pulse and stress isolation in addition. On account of the high bandwidth of the LMG500 these voltage peaks are captured properly.



Avionics: Monitoring Harmonics up to 150kHz



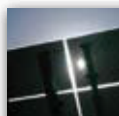
Harmonic Analysis by ZES ZIMMER software LMG-CONTROL

The on-board power supplies of modern large scale aircraft are operating with frequency up to 800Hz. Basic standards like EUROCAE ED-14D and ABDO100.1.8 are created to define limit values, as to specify those power supplies. Fundamental frequency from 360Hz to 800Hz must be assessed by their harmonics in ranges up to 150kHz. Therefore the LMG500 is best applicable.

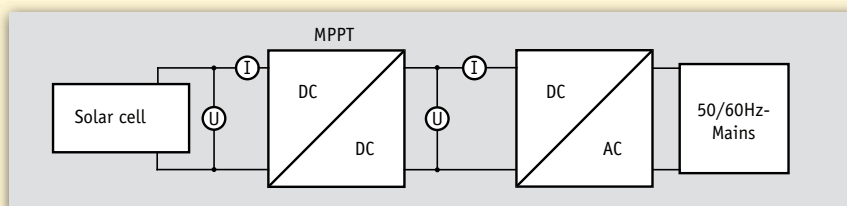
The spectral analysis of currents and voltages DC to 1MHz is supported by a separate ZES ZIMMER application software LMG-CONTROL. You will get graphical data representation in linear or logarithmic scaling. The values can also be exported as tables e. g. into MS Excel.

Harmonic analysis with LMG-CONTROL ranges up to 1MHz. The fundamental can be set user-defined from 0.07Hz to 1MHz.

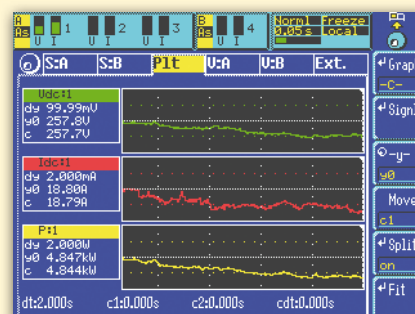
High Basic Accuracy – High Range Dynamics



Solar Technology



By assistance of the Maximum Power Point Tracker (MPPT) the operating point of a solar generator can always be kept in its optimum. While non steady solar radiation currents and power can vary between a few percent and nominal value in short time intervals. The tracking can only be optimised if measuring is consistently and without dropout e.g. that may occur while measuring range is switched. The high nominal accuracy of 0.03% allows a correct measuring of very low currents also in the 32A range.



Voltage, current and effective power high precise without range switching

High Quality Basic Configuration

The high quality basic configuration of the LMG500 at reasonable price allows comfortable working. Already included are RS232 interface, a printer interface and a powerful script editor.

Options and Accessories for Operating Extensions

IEEE488 interface

(Order no. L50-01)

Interpretation of the complete SCPI, as well as the LMG500 specific command set. The data transfer rate yields up to 1Mbyte/s.

USB interfaces

(Order no. L50-02USB)

For connection of a memory stick (front side) and another USB interface for data transfer and remote (backside).

Ethernet converter

(Order no. L50-Z318)

External adapter, all connectors will fixed and supplied by LMG.

Processing signal interface, digital and analogue in- and outputs

(Order no. L50-03)

To monitor further process magnitudes like revolution, torque etc. With assistance of the script editor efficiency and other magnitudes can be deduced and be applied as control parameters.

Flicker meter

(Order no. L50-04)

Compliant to EN61000-4-15. The evaluation of the voltage fluctuations by currents up to 16A compliant to EN61000-3-3, by currents up to 75A compliant to EN61000-3-11.

Event triggering

(Order no. L50-05)

Display and save abnormal events. Further description see below.

Star to delta conversion

(Order no. L50-06)

for 3phase-3wire systems. Further description see below.

Harmonics up to 99th for U, I, P, Q und S

(Order no. L50-08) Current, voltage and power are analysed up to 50kHz on fundamentals ranging from 0.1Hz to 1.2kHz. Evaluation of inter-harmonics is possible by dividing the given fundamental to a

lower one using it as reference. With use of the sampling values the harmonic analysis up to 1.5MHz on a external PC is given.

CE Harmonics

(Order no. L50-09) Up to the 40th, for currents up to 16A in compliance with EN61000-3-2, for currents from 16A to 75A in compliance with EN61000-3-12

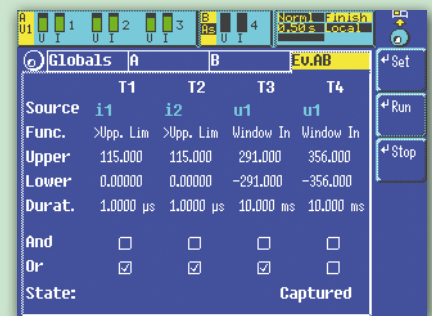
DSP Modules

(Order no. L50-010) Necessary to operate particular options.

Option: Event triggering

Order no. L50-05

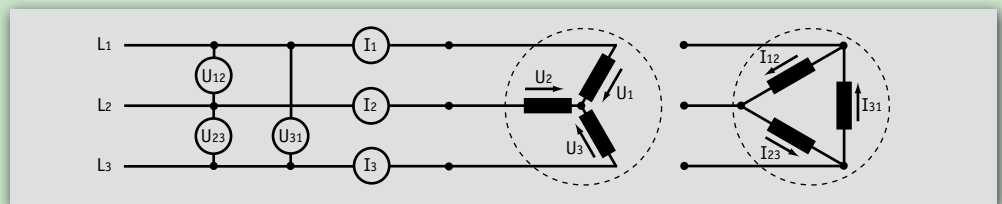
If trigger conditions are set this option operates in the background of the normal measuring mode and can be conditioned for max. four measurement values u, i, p coming from different measuring channels. By detection of given trigger conditions the scope display will be „frozen“ (display „finish“ in the status line). However, the normal measuring proceeds without any gaps, evaluating completely all sample values. Four logical connectable trigger events, which are selected via the menu, can be defined to control the U- and I measuring inputs. In each trigger event you can ascertain: Value larger/smaller, inside of/ outside of a window, event time 330ns...10s. By this and the sampling with 3Msamples/s particular peaks and dips will be detected. Via the printer interface the aligned scope picture can be printed, also the 2 million samples representing the event can be transferred via the data interface, on request. With the soft key button RUN the scope display is switched again to the current measuring mode until a new event is detected.



Conditioning of event triggering

Option: Star to delta conversion for 3phase-3wire system

Order no. L50-06



3phase-3wire system: measurement of line to line voltages and line currents

At 3phase-3wire systems only the line to line voltages U_{12} , U_{23} and U_{31} and the line currents I_1 , I_2 and I_3 are available for measurement.

By assistance of the star to delta conversion the line to line voltages can be converted into those not directly accessible phase voltages (line to neutral voltages, i. e. the phase voltages of the load as if star-connected) and the assigned active powers can be defined. In analogy the line currents can be converted into the „linked“

currents (line to line currents of the delta connected load). Out of the calculated „linked“ values other magnitudes are

deduced, as well as harmonics can be assessed. Unbalance of net and load, as well as distorted wave forms are

handled correctly by the star to delta conversion.

Link123 (U1,I1) A:9	Link123 (U2,I2) A:10	Link123 (U3,I3) A:11	Sum(9-11) A:15
Itrms 0.88827 A	0.88827 A	0.87388 A	0.87388 A
Utrms 68.719 U	68.795 U	68.746 U	68.746 U
P 4.855 W	4.352 W	3.844 W	3.844 W
Q 3.739 var	4.236 var	3.310 var	3.310 var
S 5.516 VA	6.073 VA	5.073 VA	5.073 VA

Calculated values (linked values) of the star connected windings (Wiring: 3+1, $U_{\Delta} I^* \rightarrow U \cdot I^*$)

Link123 (U12,I12) A:9	Link123 (U23,I23) A:10	Link123 (U31,I31) A:11	Sum(9-11) A:15
Itrms 0.84762 A	0.84681 A	0.84455 A	0.84455 A
Utrms 118.284 U	119.383 U	119.119 U	119.119 U
P 4.278 W	4.081 W	4.053 W	4.053 W
Q 3.658 var	3.758 var	3.426 var	3.426 var
S 5.629 VA	5.489 VA	5.387 VA	5.387 VA

Calculated values (linked values) of the delta connected windings (Wiring: 3+1, $U_{\Delta} I^* \rightarrow U_{\Delta} I_{\Delta}^*$)

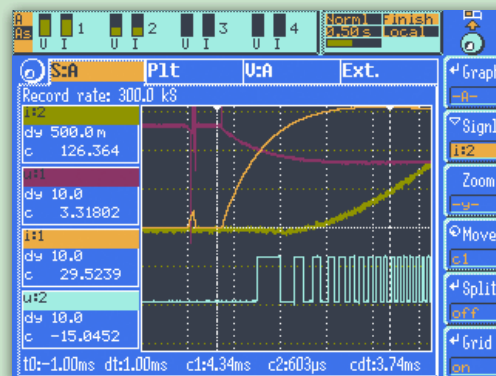
Options and accessories for expanding functions

Adapter for incremental rotary encoder

Order no. L50-Z18

Pulses of the incremental rotary encoder (signal u2 in blue) are transformed to a proportional voltage by the adapter L50-Z18, positive/negative voltage for forwards/backwards, and led to the LMG500 measuring input, here the I_{sensor} input.

Interesting details in the scope display that has been captured (status „finish“) with the option „event triggering“: u1 (red) is the motor voltage, i1 (yellow) is the motor current which rises with the electrical time constant of the rotor. About 0.7ms after applying current the motor starts with its first move and the rise of the analogue, revolution-proportional adapter output signal i2 (green) begins. 3.5ms after start up of the motor current, the rotor has moved only 8°, the rotation speed of 126U/min is already exactly received!



Rotary encoder via adapter L50-Z18 connected to a measurement channel to record a fast motor start with high resolution

SYS61K Test system in compliance with EN61000-3-2/-12 and EN61000-3-3/-11

Order no. SYS61K-3PL50

System to measure current harmonics and flicker emitted by the appliance and their effects onto mains:

- harmonic analyzer acc. EN61000-4-7
- harmonics for currents up to 16A in compliance with EN61000-3-2
- harmonics for currents from 16A to 75A in compliance with EN61000-3-12
- flickermeter acc. EN61000-4-15
- flicker (voltage fluctuation) for currents up to 16A in compliance with EN61000-3-3
- flicker (voltage fluctuation) for currents up to 75A in compliance with EN61000-3-11

The system consists of:

- a ZES ZIMMER power meter LMG500
- an AC source, as an alternative customer can implement own sources
- a reference impedance
- measuring analysis software in compliance with standards
- a PC/notebook

Ready to use delivery in a 19" cabinet or as hard-/software package for customer system integration, also with customer components



SYS61K Test system in compact 19" cabinet

Technical Data

Voltage measuring ranges U*

Voltage measuring ranges V									
Nominal value /V	3	6	12.5	25	60	130	250	400	1000
Maximum trms value /V	3.6	7.2	14.4	30	66	136	270	560	1010
Maximum peak value for full scale /V	6	12	25	50	100	200	400	800	3200
Input impedance	>4.5MΩ <3pF								

Current measuring ranges I*

Current measuring ranges 1												
Nominal value /A	20m	40m	80m	150m	300m	600m	1.2	2.5	5	10	20	32
Maximum trms value /A	37m	75m	150m	300m	600m	1.25	2.5	5	10	20	32	32
Maximum peak value for full scale /A	56m	112m	224m	469m	938m	1.875	3.75	7.5	15	30	60	120
Shunt impedance	560mΩ			68mΩ		7.5mΩ			2mΩ			

Current measuring ranges I_{HF}*:

Nominal value /A	150m	300m	600m	1.2
Maximum trms value /A	225m	450m	900m	1.8
Maximum peak value for full scale /A	313m	625m	1.25	2.5
Shunt impedance	0.1Ω			

Sensor inputs $U_{\text{Sensor}}, I_{\text{Sensor}}$

Sensor inputs		Sensor, 2Sensor							
Nominal value /V		30m	60m	120m	250m	500m	1	2	4
Maximum trms value /V		37m	75m	150m	300m	600m	1.2	2.5	5
Maximum peak value for full scale /V		62m	125m	250m	500m	1	2	4	8
Input impedance		100kΩ 34pF							

Measuring accuracy

Accuracy		± (% of measuring value + % of measuring range)									
		DC	0.05Hz..45Hz	45Hz..65Hz	65Hz..3kHz	3kHz..15kHz	15kHz..100kHz	100kHz..500kHz	500kHz..1MHz	1MHz..3MHz	3MHz..10MHz
Voltage	U*	0.02+0.06	0.02+0.03	0.01+0.02	0.02+0.03	0.03+0.06	0.1+0.2	0.5+1.0	0.5+1.0	3+3	f/1MHz*1.2 + f/1MHz*1.2
	Usensor	0.02+0.06	0.015+0.03	0.01+0.02	0.015+0.03	0.03+0.06	0.2+0.4	0.4+0.8	0.4+0.8	f/1MHz*0.7 + f/1MHz*1.5	f/1MHz*0.7 + f/1MHz*1.5
Current	I* (20mA .. 5A)	0.02+0.06	0.015+0.03	0.01+0.02	0.015+0.03	0.03+0.06	0.2+0.4	0.5+1.0	0.5+1.0	f/1MHz*1 + f/1MHz*2	-
	I* (10A .. 32A)	↓	↓	↓	↓	0.1+0.2	0.3+0.6	f/100kHz*0.8 + f/100kHz*1.2	-	-	-
	I HF	↓	↓	↓	↓	0.03+0.06	0.2+0.4	0.5+1.0	0.5+1.0	f/1MHz*1 + f/1MHz*2	-
	I sensor	↓	↓	↓	↓	0.03+0.06	0.2+0.4	0.4+0.8	0.4+0.8	f/1MHz*0.7 + f/1MHz*1.5	f/1MHz*0.7 + f/1MHz*1.5
Power	U* / I* (20mA .. 5A)	0.032+0.06	0.028+0.03	0.015+0.01	0.028+0.03	0.048+0.06	0.24+0.3	0.8+1.0	0.8+1.0	f/1MHz*3.2 + f/1MHz*2.5	-
	U* / I* (10A .. 32A)	↓	↓	↓	↓	0.104+0.13	0.32+0.4	f/100kHz*1 + f/100kHz*1.1	-	-	-
	U* / I HF	↓	↓	↓	↓	0.048+0.06	0.24+0.3	0.8+1.0	0.8+1.0	f/1MHz*3.2 + f/1MHz*2.5	-
	U* / I sensor	↓	↓	↓	↓	0.048+0.06	0.24+0.3	0.72+0.9	0.72+0.9	f/1MHz*3 + f/1MHz*2.3	f/1MHz*1.5 + f/1MHz*1.4
	U sensor / I* (20mA .. 5A)	↓	0.024+0.03	↓	0.024+0.03	0.048+0.06	0.32+0.4	0.72+0.9	0.72+0.9	f/1MHz*1.4 + f/1MHz*1.8	-
	U sensor / I* (10A .. 32A)	↓	↓	↓	↓	0.104+0.13	0.4+0.5	f/100kHz*1 + f/100kHz*1	-	-	-
	U sensor / I HF	↓	↓	↓	↓	0.048+0.06	0.32+0.4	0.72+0.9	0.72+0.9	f/1MHz*1.4 + f/1MHz*2	-
	U sensor / Isensor	↓	↓	↓	↓	0.048+0.06	0.32+0.4	0.64+0.8	0.64+0.8	f/1MHz*1.12 + f/1MHz*1.5	f/1MHz*1.12 + f/1MHz*1.5

additional measurement uncertainty in the ranges 10A to 32A: $\pm I_{rms}^2 \cdot 30 \mu A / A^2$

Accuracies based on:

- sinusoidal voltage and current
- ambient temperature (23 ± 3) °C
- warm up time 1h
- definition of power range as the product of current and voltage range, $0 \leq |\lambda| \leq 1$, (λ =Power factor=P/S)
- calibration interval 12 month

Other values

All other values are derived from the current, voltage and active power values. Accuracies for derived values depend on the functional relationship (e.g. $S = I \cdot U$, $\Delta S/S = \Delta I/I + \Delta U/U$)

Isolation

All current and voltage inputs isolated against each other, against remaining electronic and against earth
max. 1000V/CATIII resp. 600V/CATIV

Synchronization

The measurement is synchronized on the signals period. There is a choice to determine the period from „line“, „extern“, u(t), i(t) as well as their envelopes, combined with settable filters. By this very stable readings are achieved, even at signals of pulse width modulated frequency inverters and amplitude modulated electronic ballasts

Harmonic analysis (option CE Harm L50-09)

Measuring of current and voltage with evaluation in full compliance with EN61000-3-2/-12, measurement according to EN61000-4-7

Harmonic analysis (option Harm100 L50-08)

Analysis of current, voltage (incl. phase angle) and power up to 99th harmonics, in total 100 harmonics including DC component. Fundamental in the range from 0.1Hz to 1.2 kHz. Analysis up to 10kHz (50kHz without antialiasing filter). By integer divider (1...128) a new reference fundamental can be created as to detect interharmonics. Externally on PC up to 1MHz with LMG-CONTROL software.

Flicker measuring (option L50-04)

Flicker meter according to EN61000-4-15 with evaluation in full compliance with EN61000-3-3/-11

Transients (option L50-05)

Detecting and recording of transients >330ns

Scope function (standard)

Graphical representation of sampled values versus time

Plot function (standard)

Time (Trend) diagram of max. 4 readings, minimal resolution 50ms, respectively 10ms in 50Hz half-wave (flicker) mode

Star delta conversion (option L50-06)

Sums and differences between channels on sample basis

Computer interfaces

RS232 (standard) and **IEEE488.2 (option L50-01)**, additional **USB 2.0 Typ B (L50-02USB)**, **Ethernet 10/100 Base-T RJ45 (option L50-Z318)** available. Only one interface can be used at the same time

Remote control

All functions can be remote-controlled, keyboard lock for measuring parameters

Output data

Output of all readings, data formats BIN/ASCII, SCPI command set

Transfer rate

RS232: max.115200 Baud, IEEE488.2: max. 1MByte/s

USB-stick connector (option L50-02USB)

For logging data

Printer interface (standard)

Parallel PC-Printer interface with 25-pin SUB-D socket, printing measuring values, tables and graphics to matrix, inkjet or laser printers

Processing signal interface (option L50-03)

- 2 x 25 pin SUB-D socket with:
- 8 analog inputs for process magnitudes (24Bit, ±10V)
 - 8 analog outputs (14Bit, ±10V)
 - 8 digital inputs
 - 8 digital outputs
 - 2 input for frequency (0.05Hz...6MHz) and rotation direction
 - in- and outputs are isolated against other electronics (test voltage 500V)

Other data

Dimensions/Weight

- Bench case 1 to 4 channels W 433mm x H 148mm x D 506mm / about 12kg
 - Bench case 1 to 8 channels W 433mm x H 283mm x D 506mm / about 23kg
 - Accessories: brackets for 19" rack, 84PU, 3HU, D 464mm
- EN61010 (IEC61010, VDE0411), protection class I
EN61326
IP20 in accordance to EN60529
0...40°C/-20...50°C
Normal environment conditions according to EN61010
100...240V, 50...60Hz, max. 150W (4 channel device), max. 300W (8 channel device)

LMG500 application software

(Name of software is equal with order number, please request detailed data sheets)

LMG-CONTROL

Individual configuration of measurement, using all features of the LMG500, spectral analysis, remote of LMG500, storage in MS Excel readable format (e.g. CSV-file)

Waveform analysis module

Logging and analysis of all sampling values

PQA-SOFT

Software especially designed for power quality analysis (acc. EN50160), easy configuring of measurement in a few steps

SYS61K-1/3-SOFT

Control and evaluation software for test systems of harmonics and flicker according to EN61000-3-2/-3/-11/-12

Measurement Accessories and Extensions

„Plug N'Measure“ current sensors for extended current ranges up to 5000A
Order no. and detailed datasheets on request

(1) Precision DC	0.02%	DC	to 1MHz	0.8A to 5000A
(2) Precision AC	0.02%	15Hz to 5kHz	5A	to 1500A
(3) Clamp on CT	0.15%	2Hz to 50kHz	0.3A to 3000A	
(4) Wideband AC	0.25%	30Hz to 1MHz	10A to 1000A	
(5) Low Cost Hall	0.3%	DC	to 200kHz	0.3A to 2000A



Example (1):
Prec. current transducers PSU700-L50 for 700A



Example (2):
Prec. AC current transformer LMG-Z502 for 1500A



Example (3):
Clamp-on current sensor L45-Z06 for 40A, 5Hz to 20kHz

Detailed specifications and selection guide in the handbook „ZES Sensors and Accessories“, available on request.



Example (4):
Prec. wideband current transformer LMG-Z601 for 100A, 30Hz to 1MHz



Example (5):
Hall effect current sensors L50-Z29 Hall for 50A to 1000A

Precision high voltage divider

Precision high voltage divider for 3/6/9/12/30kV to 300kHz, 0.05%
Negligible phase error, therefore best suited for wideband power measuring.

- 1-channel HST for single ended voltages
- 2-channel HST for floating voltages (difference measuring)
- 3-channel HST for three phases systems (inverters)

Power quality analysis in railway technology and medium-voltage systems. Insulation diagnostics by $\tan \delta$ measuring down to 0.1Hz. Suitable for outdoor application (IP65) with high over-voltage.



HST30 for 30kV, single-phase



HST12-3 for 12kV, three-phase

RS232 - Ethernet - converter, 10/100mbit

Order no. L50-Z318

External adaptor, all connectors will be fixed at the LMG, supply by LMG

Adapter for 3-phase measurements

Order no. LMG-MAK3

- CEE-Plug, 5 pins, 16A, 2m supply cord
- CEE-Socket, 5 pins, 16A, for EUT
- Socket for supplying the meter LMG500/LMG450
- 4mm safety sockets, measuring access to current and voltage
- Safety acc. IEC61010: 300V/CATIII

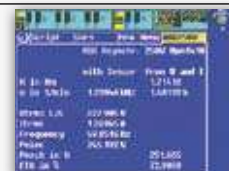


LMG-MAK3

M-n motor torque soft

Order no. L50-O16

Torque and speed directly calculated from measured motor current and voltage. Supplied by frequency inverters or directly by 3-phase-net. Applicable for motors acc. to IEC-standards. Accuracy from 0 to 1.5 fold nominal torque better than 2%. Configurable with plugin in LMG-CONTROL software.



PC Software

Order no. LMG-CONTROL-B

PC software for data transfer, configuration and visualisation, Modular design, saves and loads device configurations. Interactive mode to set up the measurements. Recording and storage adds timestamps with accuracy in the range of milliseconds. Analysing modules for different applications. Basic version is free of cost.

Order no. LMG-CONTROL-WA

Additional module for LMG-CONTROL, logging and analysis of all sampling values of the LMG, harmonic analysis up to 1MHz, frameanalyser, logging of transients.



Calibration certificate

Order no. KR-L50-B

Order no. KR-L50-CHN*

*For each power channel

Calibration with certificate, traceable according to ISO9000

Calibration and service package for extended warranty

Order no. L50-KSP

With the purchase of the calibration and service package the warranty will be extended every year for further 12 months according to your wishes and technical applications.
The necessary access is the calibration according to ISO9000 at first delivery of the device. After 12 months the device has to be sent back to ZES ZIMMER for a further calibration and if necessary for adjustment. Along with the calibration the appropriate maintenance work is accomplished. During the warranty period and extended warranty period

all incidental repair work is accomplished free of charge. Repairs of failures through abrasion and faulty handling are excepted from the warranty. Requirement for extended warranty and its continuation is the calibration at first delivery and the annual due in time calibration in continuity. The required extension always needs our written acknowledgement. On this way a warranty time of 10 years or longer can be achieved.



Subject to technical changes, especially to improve the product, at any time without prior notification.



Capítulo 11:

BIBLIOGRAFÍA

11.- BIBLIOGRAFÍA

- ⁽¹⁾F. YEVES, P.M. MARTÍNEZ, J.M. LEDEIRA, “A high performance microcontroller solar invertir”, European Community Comission, 9th European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- ⁽²⁾M. CASTRO, A. COLMENAR, L. DÁVILA, “Energía solar fotovoltaica. Monografías técnicas de energías renovables.” Editorial Progresa, tomo 7.
- ⁽³⁾M. CASTRO, A. COLMENAR, L. DÁVILA, “Sistemas fotovoltaicos conectados a red. Monografías técnicas de energías renovables.” Editorial Progresa, tomo 7.
- ⁽⁴⁾S. MARTINEZ GARCÍA, J.A. GUALDA GIL, “Electrónica de potencia. Componentes, topologías y equipos”. UNED, Editorial Thomson.
- ⁽⁵⁾ASIF, APPA, ADL. “El papel de la energía solar fotovoltaica en España”.
- ⁽⁶⁾PLATAFORMA TECNOLÓGICA FOTOVOLTAICA EUROPEA. “Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology.”
- ⁽⁷⁾J. P. MORGAN. “Global solar investor”.
- ⁽⁸⁾AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA. “Perspectiva sobre la tecnología energética”.
- ⁽⁹⁾R.M. LAMAISSON. “Apuntes sobre energía solar fotovoltaica”.
- ⁽¹⁰⁾R. THOMAS, M. FORDHAM. “Photovoltaics and Architecture”.
- ⁽¹¹⁾P. SARMIENTO. “Energía solar. En arquitectura y construcción”. Ediciones Ingesol Ltda.
- ⁽¹²⁾P. SARMIENTO. “Energía solar.Aplicaciones e ingeniería”. Ediciones Universitarias Valparaiso de la Universidad Católica de Valparaiso.
- ⁽¹³⁾P. IBÁÑEZ EREDIO. “Energía fotovoltaica. Aplicaciones y sistemas de generación”. Fundación ROBOTIKER.
- ⁽¹⁴⁾M. A. ABELLA. “Introducción al diseño y dimensionado de instalaciones de energía solar fotovoltaica.”

- ⁽¹⁵⁾CIEMAT. “Informe de medida de inversor autónomo S-1200 fabricado por SOLENERSA”.
- ⁽¹⁶⁾V. MUÑOZ DÍEZ. “Sistemas fotovoltaicos conectados a red”. Grupo de investigación IDEA. Universidad de Jaén.
- ⁽¹⁷⁾CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE Y ORDENACIÓN PÚBLICA. “Compendio de normativas de energías renovables”. Comunidad de Madrid.
- ⁽¹⁸⁾E. LORENZO. “La energía que producen los sistemas fotovoltaicos conectados a red”. Instituto de energía solar, Universidad politécnica de Madrid.
- ⁽¹⁹⁾M. ALONSO ABELLA, F. CHENLO. “Inversores para conexión de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica”. CIEMAT.
- ⁽²⁰⁾REVISTA ERA SOLAR, Número 134. “Resultado de medidas de inversores para Sistemas Fotovoltaicos.”
- ⁽²¹⁾REVISTA ERA SOLAR, Número 139. “Conexión fotovoltaica conectada a red”.
- ⁽²²⁾REVISTA ERA SOLAR, Número 141. “Nuevos métodos de incrementar el rendimiento”.
- ⁽²³⁾ROBOTIQUER TEMALIA, Revista digital. “Aplicación de la energía y edificación en Madrid. Edificación con energía solar fotovoltaica conectada a red”. Colección de documentos Técnicos. Conserjería de Política Territorial. Dirección General de Arquitectura de la Comunidad Madrid.
- ⁽²⁴⁾REVISTA PHOTON, Número 10/2008. C. PODEWILS. “Más eficiencia en el sistema”.
- ⁽²⁴⁾REVISTA PHOTON INTERNATIONAL, Septiembre 2008.” *Reaching for the stars*”.